Teoría y Técnicas de Medición RF

Equipos utilizados en enlaces de Microondas, Satelitales, Televisión y Telefonía Celular



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Luis Fernando Zapata González

Facultad de Ingeniería

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Especialización en Telecomunicaciones Móviles

Director

Ing. Juan Carlos Gómez Paredes

Diciembre 2024

Dedicatoria

A mis padres, hermanos y maestros.

A mi esposa Rita Inés, Paula, Agatha.

A mis hijos Natalia y Sergio Andrés.

A mis amigos.

Contenido

Dedicatoria …… 2
Contenido …….... 3
Indice de figuras ……5
Indice de tablas ……..7
Glosario ……8
Lista de abreviaturas y siglas …….. .9
Resumen …… 10
Introducción.....12
Planteamiento del problema 14
Justificación.....15
Objetivos.....16
Marco de referencia.....17
Marco teórico.....18
Marco Legal.....19
Metodología.....20
Desarrollo de la propuesta.....21
Teoría y Técnicas de Medición RF: 21
Radios digitales 22
Conceptos básicos de medición RF:..... 23
Bandas de frecuencias del espectro electromagnético: 24
Instrumentos utilizados para medición de RF: 25
Imágenes de instrumentos utilizados para mediciones de RF:..... 25
Teoría intensidad de campo eléctrico:..... 26
Configuración del equipo para mediciones de intensidad de campo 27
Procedimiento matemático:..... 28
Mediciones con AE (matemáticamente): 29
Cálculo del factor de antena K 29
Medición de Pérdidas por retorno: 37
Mediciones BER ……..46
Interpretar resultados:..... 46
Equipos utilizados 47
Realización de la prueba..... 47
Análisis de resultados:..... 48
Generación de informe:..... 48
Ejemplo práctico enlace LTE 48
Equipo para DVB (Digital Video Broadcasting): 49
Equipos para LTE (4G) 49
Instrumento para medir Sistema 5G:..... 49
Mediciones Jitter: 50
Calidad de servicio (QoS): 51

Efectos jitter y mediciones: 52
Fluctuación de medición ……..58
Método de observación..... 58
Equipos utilizados: 59
Configurar la prueba:..... 60
Realizar mediciones para red de datos IP:..... 60
Cómo interpretar los resultados para mantener los estándares de calidad: 78
Mediciones en un enlace satelital:..... 79
Medición de la figura de mérito en recepción (G/T):..... 83
Medición práctica G/T en una antena satelital de 11 m. de diámetro: 87
Cálculo G/T polarizaión LHCP utilizando LHCP usando la fórmula:..... 87
Medición de la Ganancia en Transmisión LHCP y calibración EIRP: 89
Pruebas de transmisión de canales de Televisión..... 93
Componentes básicos del sistema de televisión:..... 94
Estándares principales: 95
Mediciones básicas de señales de RF en sistemas de televisión: 95
Instrumentos de Medición:..... 96
Procedimientos y Metodología:..... 97
Bandas de frecuencias: 97
Requisitos para medición: 97
Protocolos de medición: 98
Señal de Televisión. Portadoras: Video y audio……...99
Despliegue de la tecnología CDMA:..... 113
Medición de cobertura:..... 118
Medición de calidad: 118
Mediciones de capacidad:..... 118
Mediciones relacionadas con la conexión:..... 119
Mediciones de interferencia: 119
Mediciones específicas de tecnologías: LTE/4G: 120
Mediciones específicas de tecnologías 5G:..... 120
Herramientas para realizar las mediciones:..... 120
Importancia:..... 122
Factores que afectan a ACLR:..... 122
Medición ACLR:..... 122

8. Conclusiones y Recomendaciones 129
Referencias bibliográficas 131
10. Anexos.....133

Índice de figuras

Figura 1: Descripción de la banda de frecuencias 10
Figura 2: Imágenes de instrumentos utilizados *11*
Figura 3: Configuración de equipo para medición de intensidad de campo 12
Figura 4: Configuración para medición de intensidad de campo SF 17
Figura 5: Analizador de espectro 966 19
Figura 6: Pérdidas por retorno simuladas 20
Figura 7: Set up de calibración 21
Figura 8: Set up medidas de pérdidas por retorno 21
Figura 9: Instrumento de medición BER 24
Figura 10: Diagrama de bloques para medición BERT 24
Figura 10a Medición BER en un enlace fibra óptica 25
Figura 11: Recuperación de datos utilizando reloj 30
Figura 12: Sensibilidad a la fluctuación de fase del receptor 31
Figura 13: Recuperación de datos extrayendo el reloj 31
Figura 14: Mediciones utilizando un reloj de referencia 32
Figura 15: Componentes de fluctuación de fase (medidos) 33
Figura 16: Observaciones de fluctuación de fase auto-activadas 34
Figura 17: Estructura del método 36
Figura 18: Cuatro niveles de la calidad del servicio 37
Figura 19: Latencia extremo a extremo en Internet móvil 37
Figura 20: Pérdidas de paquetes en el enrutador A 39
Figura 21: Rendimiento para transferencia de archivo cliente/servidor 40
Figura 22: Representación gráfica del jitter 41
Figura 23: Resultados de medida con el osciloscopio R&S RTO 41
Figura 24: Resultado de medidas usando analizador de ruido de fase R&S FSWP 42
Figura 25: Configuración de un sistema satelital 46
Figura 26: Estructura de una estación terrena 49

Figura 27: Interconexión de antenas en enlaces de microonda ……50
Figura 28: Patrón de radiación de antena en una estación terrena satelital ……..51
Figura 29: Diagrama de radiación de antena satelital ……..52
Figura 30: Señal de prueba utilizando AE ……52
Figura 31: Señal C/No utilizando AE …… 53
Figura 32: Señal C+N/N utilizando AE ……..53
Figura 33: Medición densidad de potencia utilizando AE ……...55
Figura 34: Montaje para medición tx/rx de estación terrena ……..58
Figura 35: Señal de televisión Portadoras: Video/audio ……63
Figura 36: Medida de canal de televisión analógico utilizando AE ……...70
Figura 37: Medida de canal digital utilizando AE ……71
Figura 38: Medición de un canal digital utilizando medidor de campo ……72
Figura 39: Equipo de prueba para mediciones de comunicaciones inalámbricas ……73
Figura 40: Medición de canales adyacentes ……78
Figura 41: Medición de relación de error de bloques BLER …… 80
Figura 42: Medición de análisis de potencia dinámica ……81
Figura 43: Análisis de potencia dinámica ……82

Índice de Tablas

Tabla 1. Conversión para impedancia de entrada 50 Ω ……..... 34

Tabla 2. Conversión para impedancia de entrada 75 Ω …….....34

Tabla 3. Conversión de unidades …….....35

Tabla 4. Relaciones entre unidades de potencia …… .42

Tabla 5. Comparación de valores ideales ……63

Tabla 6. Características para medida jitter ……73

Tabla 7. Resultados de mediciones jitter …… 74

Tabla 8. Resultados G/T polarización LHCP……...89

Tabla 9. Mediciones C/No utilizando AE ……...90

Tabla 10. Resultados Ganancia Tx,- polarización LHCP ……93

Tabla 11. Resultados Ganancia Tx – polarización RHCP ……94

Tabla 12. Valores para las bandas IV y V ……...101

Tabla 13. Valores para las bandas IV y V ……. 102

Tabla 14 Limitaciones de ruido en un sistema B,G ……102

Tabla 15. Valores para ganancia de antena y pérdidas en el cable ……102

Tabla 16. Designación de bandas de frecuencia…… 103

Tabla 17. Barrido de frecuencias ……104

Tabla 18. Normas de radio difusión televisiva técnicos FCC ……107

Tabla 19 Basada en datos TASO ……107

Tabla 20. Frecuencias de canales de televisión …… 108

Glosario

Reed-solomon: Código que se forma sobre la base de grupos de bits que se denominan símbolos.

VoIP: Tecnología que permite realizar llamadas de voz a través de la red utilizando banda ancha.

RTT: Tiempo de ida y vuelta.

Throughput: Tasa promedio de éxito en la entrega de un mensaje en un canal de Comunicación.

RTTP: Real time Transport Protocol Protocolo de seguridad para facilitar la privacidad y la seguridad de datos en comunicaciones por Internet.

HSDPA: Tecnología también denominada 3.5G, 3G+ o mini 3G Es la optimización de la tecnología espectral UMTS/WCDM.

IoT: Internet de las cosas.

PRBS: Pseudo-Random Binary Sequence - Secuencia binaria pseudo-aleatoria

DVB: Digital Video Broadcasting - Transmisión de video digital

QoS: Calidad del servicio.

FEC: Técnica utilizada para controlar los errores en una transmisión de datos a través de canales de comunicación.

Handover rate: Indicador de rendimiento KPI para confiabilidad de la red cuando los usuarios se desplazan entre celdas.

RSRP: Reference signal received power - Señal de referencia de potencia recibida.

ACLR: Control de interferencia del canal adyacente.

TASO: Television Allocation Study Organization - Organización del estudio de asignación de Televisión.

Lista de Abreviaturas y Siglas

Sigla/Abreviatura	Significado
ETSI	European Telecommunications Standards Institute.
FEC	Fordward error correction.
VoIP	Voice over Internet Protocol.
RTTP	Real time transport protocol.
NTSC	National Television System Committee.
PAL	Phase Alternating Line.
SECAM	Sequentiel couleur avec memorie
HSDPA	High speed downlink packet access
PRSTM	Proveedores de Redes y Servicios de Telecomunicaciones Móviles

Resumen

En la práctica, todos los que realizan alguna actividad relacionada con las mediciones, aplican diferentes métodos (Procedimientos documentados) con la finalidad de gestionarlas. Deben ser técnicamente válidas conforme a principios científicos. Estos suministran el respaldo teórico y/o experimental de las mismas. El objetivo general consiste en proponer una metodología de mediciones para redes a nivel de radio frecuencia/datos, estableciendo un enfoque sistemático y estandarizado de modo que se garantice la obtención de la información de manera precisa y confiable. No existe una metodología única de medición. Los parámetros se adoptan al concepto y a las variables que se desean medir.

Se analizarán metodologías de mediciones de campo (Parámetros de calidad) que se encuentran consignados en el anexo 5.3 de la resolución CRC5050 de 2016 actualmente vigentes. Estas son: A: Mediciones de campo. Calidad: Para acceso al servicio Internet a través de redes móviles a cargo de PRSTM. B: Mediciones de campo comparativas de calidad: Para servicios de comunicación prestados a través de redes móviles y fijas en cabeza de CRC. Los resultados esperados se orientarán a una formulación de alternativas de regulación y ajuste de las medidas vigentes en materia de calidad, concerniente a las metodologías de mediciones de campo.

Debe tenerse en cuenta la práctica de la recolección de muestras en ambos tipos de mediciones y necesidades de información de los usuarios. La relevancia de este trabajo consiste en que las mediciones de calidad del servicio de Internet móvil, verifican si los proveedores de redes y servicios, cumplen los requisitos mínimos exigidos por la regulación (para los servicios de los usuarios) teniendo en cuenta que son estas empresas las que soportan con su estructura los servicios. Estos requisitos se fijan en el régimen de calidad establecido en el título V de la resolución CRC 5050 de 2016.

La calidad de servicio de datos móviles se medía para la tecnología 3G, a través de instrumentos de medición instalados por los operadores móviles en algunos puntos de su red en algunas ciudades o municipios seleccionados. Realizaban pruebas a fin de determinar 3 parámetros que indicaban la calidad que se ofrece a los usuarios. Esto es: Retardo, velocidad de descarga de contenidos y velocidad de descarga de los archivos. En julio de 2022, la CRC emitió la resolución 6890 para actualizar las normas de calidad con las que se prestan los servicios de telecomunicaciones en Colombia.

Introducción

Los radios digitales han transformado las comunicaciones inalámbricas (Señales digitales), alcanzando una mayor eficiencia en transmisión de datos, mejor uso del espectro electromagnético e implementación de técnicas avanzadas respecto a: Modulación digital, corrección de errores y métodos utilizados para protección de información.

Las señales digitales están expuestas al desvanecimiento: Obstáculos o interferencias que ocasionan pérdidas temporales de información y por lo tanto degradación del servicio. La sincronización de tiempos es crítica. La diferencia en la temporización TX/RX. Causa errores en la decodificación de la señal. Adicionalmente, los procesos de conversión/corrección de errores añaden cierta latencia en la comunicación. Para abordar lo expuesto, es fundamental realizar mediciones precisas en las redes de radios digitales: Pruebas de calidad de Servicio, análisis de espectro, pruebas de BER y uso de herramientas de simulación.

Este enfoque es integral. Combina una comprensión profunda de los principios teóricos con mediciones prácticas. Esto es esencial para optimizar el desempeño de los radios digitales y resolver problemas operativos en las redes actuales. El desarrollo del trabajo está dividido en 2 partes. La primera parte proporciona una introducción a los conceptos y la implementación de la radio digital. La segunda parte, revisa las degradaciones que pueden ocurrir en un sistema de radio digital práctico y cómo estas degradaciones afectan el rendimiento de un enlace de radio. Se presentan las mediciones como parte de la solución de estos problemas. Este trabajo es una guía gráfica. Proporciona suficiente información para usarse como una nota de aplicación normal. Se explicará lo siguiente:

Pruebas de Calidad de Servicio (QoS**)**: Evaluar el rendimiento del sistema en términos de latencia, ancho de banda, jitter y pérdida de paquetes. Se debe asegurar que cumplen con los estándares requeridos.

Análisis de Espectro**:** Se Utilizan analizadores de espectro AE para identificar interferencias y ajustar las frecuencias de operación para minimizar el ruido.

Pruebas de BER (promedio de bits errados): Esta prueba mide la tasa de errores en la transmisión digital. Es importante para determinar la robustez del sistema en un entorno real.

Uso de Herramientas de Simulación**:** Simulaciones en software o herramientas específicas que permitan modelar y prever el rendimiento del sistema bajo distintas condiciones.

Planteamiento del problema

La medición de señales en redes de comunicaciones es fundamental. Asegura calidad, solución de problemas y cumplimiento de normativas en el medio de las comunicaciones. Permite garantizar la calidad y la integridad de las mismas. Al medir parámetros (potencia de la señal, relación Señal/ruido y la distorsión), asegura que la señal se transmita y se reciba de una manera efectiva. Se logrará confiabilidad de las comunicaciones.

Las mediciones ayudan a identificar/solucionar problemas en la red. Si una señal no está dentro de los parámetros esperados, se pueden detectar fallas o interferencias que afectan el rendimiento del sistema. No solamente se mejora la experiencia del usuario, sino que también optimizan los recursos de la red. La medición de señales es esencial para el cumplimiento de normativas y estándares de calidad. Muchas veces, las regulaciones exigen realizar mediciones periódicas para asegurar que los equipos operen dentro de los límites establecidos. Esto contribuye a la seguridad/eficiencia del sistema.

La relevancia de las mediciones en una red de comunicaciones, consiste en evaluar la calidad de la señal y el rendimiento de la red. Se incluyen parámetros adicionales como son: Latencia, ancho de banda y pérdida de paquetes de datos. Estos deben ser mantenidos en niveles aceptables. Para optimizar recursos, las mediciones permiten analizar el uso de la red, especialmente en las de “alta demanda”. En estas es necesario gestionar el tráfico de manera eficiente con la finalidad de evitar congestiones.

Las mediciones aplican para la planificación futura de la red. Al entender cómo se comporta bajo diferentes condiciones. De esta manera se pueden tomar decisiones informadas sobre expansiones o mejoras efectivas.

Justificación

Las mediciones impactan directamente en el rendimiento y la calidad del servicio. Debe implementarse un proceso de mejora continua en áreas geográficas según se requiera. No obstante, algunas presentan dificultades para acceso.

Sin datos precisos, es difícil sugerir qué aspectos serán susceptibles de mejorar. La finalidad es lograr una aceptable disponibilidad de la red. El siguiente paso consiste en tomar decisiones informadas y soportadas por una base sólida como son las mediciones. Los datos obtenidos permitirán evaluar el rendimiento actual de la red y el impacto de cambios o inversiones en la infraestructura de la misma.

Lo primordial es la satisfacción del cliente. Consiste en ofrecer un servicio de calidad, resolviendo con rapidez, incidentes que impacten el funcionamiento de la red. Factores importantes que logran la retención de usuarios y su competitividad en el medio.

Finalmente, la estrategia utilizada para obtener datos confiables se logra con mediciones acertadas. Son esenciales para planificación a corto y/o mediano plazo. Esto permite anticipar necesidades futuras y en consecuencia evaluar la efectividad de nuevas tecnologías para adaptar e innovar hacia las tendencias del mercado. La red se mantendrá competitiva y destacándose en el entorno de las comunicaciones.

Objetivos

Objetivo General:

Realizar las mediciones que permitan garantizar un set de datos y realizar simulaciones comparadas con las calculadas. A lo largo del trabajo, se detallarán aspectos teóricos que permitan realizar un modelo con determinadas características.

De igual manera, se ilustrará cómo se afectan las distintas características del canal y sus efectos en la recepción de información (pérdidas del canal dependiendo de las distancias y de las variaciones de potencia respecto a una media estimada).

Objetivos específicos:

- Discutir cada uno de los tipos específicos de medidas TX/RX, observados en la sección que se desarrollará durante el proceso. Se limitará a descripciones básicas de las mediciones.
- Mostrarán diferentes efectos que pueden existir en un canal (pérdidas de trayecto, pérdidas por difracción o tipos de modulación utilizados).

Marco de referencia

Antecedentes

En una red de telecomunicaciones se siguen disciplinas y conceptos fundamentales que permiten comprender y evaluar el rendimiento, la eficiencia y la calidad de servicios en una red. Los principales elementos que constituyen este marco son los siguientes:

- Teoría de comunicación y señales: Modulación/demodulación, relación señal/ruido y capacidad del canal.
- Radio frecuencia y propagación: Propagación de ondas electromagnéticas, interferencias, atenuación, desvanecimiento y reflexiones.
- Teoría de redes y sistemas de comunicación: Arquitectura de redes, topología y rendimiento de la red.
- Instrumentación y herramientas: Equipos de medición y software de análisis.
- Normas y regulaciones: Regulaciones de espectro y calidad de servicio QoS.
- Ingeniería de tráfico y capacidad: Modelos de tráfico, bloqueo y congestión.
- Calidad de la experiencia QoE: Percepción del usuario final.

Estos conceptos son la base para garantizar que la red funcione de manera óptima para cumplir con los estándares de calidad y servicios esperados.

Marco teórico

Los métodos de pruebas y mediciones evalúan el estado de funcionamiento de una red (portadoras y señales). Existen métodos de análisis para tal fin. Las señales se caracterizan por su operatividad y aplicación en los diferentes procesos. Para detectarlas existen equipos de medición y métodos para realizar seguimiento del desempeño de los diferentes dispositivos y de paso, evaluar módulos que componen la red. Los requerimientos para monitoreo operacional básico, incluyen muestreo de señales digitales. Ejemplo: Disponibilidad de datos, errores que aparecen en un formato patrón, etc.

Para estudios y mediciones de intensidad de campo eléctrico, aparecen interferencias que afectan el patrón de radiación de una estación transmisora. Una medición determina si un sitio que se pretende cubrir con la señal irradiada por una antena (colocada en una estación transmisora) se ajusta a requerimientos exigidos. Este paso, certifica si la frecuencia asignada para una aplicación determinada se encuentra “Limpia”. Esto implica que al modularla (audio/video), se lograrán niveles apropiados.

Se requiere un estudio previo a las mediciones en el cual se considere la potencia irradiada, atenuación por espacio libre. Se conocerá de forma teórica (matemáticamente), la intensidad de campo eléctrico que debería detectarse en el punto de medición. Estos cálculos se basan en la recomendación ITU-R P 370-7 para el rango de frecuencias 30 MHZ – 1000 MHZ.

Es relevante conocer y determinar todos los parámetros del sistema del enlace bajo prueba. Al igual conocer la configuración de la red, capacidad del sistema, objetivos de desempeño, bandas de frecuencias de radio, requerimientos de potencia, etc. Deben fijarse conceptos de propagación atmosférica y su impacto en el desempeño del sistema de radio. Principios de modelos de cálculos

y/o mediciones se tendrán en cuenta para tratar de explicar el comportamiento de las ondas radiadas, aparentemente impredecibles durante la propagación a través de la atmósfera.

La etapa de planeación de mediciones, previamente constata si un determinado enlace de RF se encuentra operando en condiciones óptimas. En caso tal, el objetivo principal de una medición de datos que viajan a través de estos enlaces será exitoso. No habrá degradación de trenes de datos. De hecho, los niveles de BER serán aceptables y cumplirán con las normas internacionales. Entendiendo los objetivos al igual que los modelos de predicción, debe contarse con el aporte de un Ingeniero de Planeación.

El desempeño y las interrupciones, debidas a efectos de la propagación (lluvia), problemas de interferencias y fallas de equipo deben ser evaluadas. Para mejorar el desempeño de la red, deben seleccionarse frecuencias de radio y tipos de antenas para futuras expansiones.

Marco Legal

Debe tenerse en cuenta las regulaciones del espectro radio-eléctrico. Las redes de telecomunicaciones deben operar dentro de las frecuencias asignadas por el ente regulador ITU y los organismos locales. Las mediciones aseguran que las emisiones no excedan los límites establecidos. La calidad del servicio QoS y sus estándares, establecidos (ETSI o 3GPP) son esenciales para medir la satisfacción del usuario final.

Las normas (leyes, decretos y resoluciones de carácter nacional e internacional) promulgadas por países, asociaciones, instituciones u organismos, deben ser conformadas aprobadas y legalizadas. Intervienen en el desarrollo del trabajo de investigación y deben ser tenidas en cuenta.

Metodología

El objetivo general consiste en determinar el desempeño y la calidad de las comunicaciones en diferentes redes (redes móviles, TV digital, enlaces de microondas). Este trabajo se soporta en mediciones según los requerimientos, identificando áreas de cobertura y calidad de las señales.

En el proceso es importante realizar una toma de información (datos) según formatos diseñados para cada caso. Con esta información como base, se planea una optimización de la red siguiendo estándares regulatorios.

Se sigue un análisis preliminar, evaluando el tipo de red y las mediciones importantes: Jitter y latencia. Según el caso se seleccionan los parámetros estándares a medir.

Posteriormente se diseña un plan de mediciones. Se ubican las zonas objetivo (urbanas o rurales) definiendo rutas/horarios. Se sugiere el diseño de un cronograma y se generan recursos para efectuar las mediciones.

Las condiciones ambientales óptimas deben ser tenidas en cuenta para ejecutar labores. Para implementar las mediciones se seleccionan las herramientas hardware y software, utilizadas a lo largo de este trabajo. Es importante seguir las técnicas y los métodos paso a paso que serán explicados.

Durante el análisis debe realizarse un proceso: Filtrar, clasificar y en lo posible mapear los resultados utilizando el software especializado. Se generan tablas, mapas de cobertura, gráficos de calidad de la señal y comparativos con umbrales definidos, obtenidos en pantallas de los instrumentos utilizados.

La evaluación de indicadores identifica zonas con problemas (zonas muertas o interferencias). Se comparan los resultados con estándares de calidad: ITU-T G.1011 para QoS.

Se generan informes técnicos que incluyen datos gráficos y análisis detallados, suministrando recomendaciones para optimización de red (cambio de antenas, frecuencias, niveles de potencia).

El Ingeniero asignado debe entregar finalmente, resultados y sugerencia de acciones de mejora basadas en mediciones realizadas. El impacto esperado consiste en mejorar la calidad del servicio, asegurar el cumplimiento normativo y aumentar la satisfacción del usuario final.

Desarrollo de la propuesta

Teoría y Técnicas de Medición RF:

Este trabajo describe una metodología comparativa para realizar mediciones en campo. En el caso de parámetros de calidad, se encuentran consignadas en el anexo 5.3 de la resolución CRC 5050 de 2016, actualmente vigentes a saber:

- **Mediciones en campo:** Mediciones de calidad para el servicio de acceso a Internet a través de redes móviles a cargo de los PRSTM.
- **Mediciones en campo:** Comparativas de calidad para los servicios de telecomunicaciones prestados a través de redes móviles y fijas en cabeza de la CRC.

Los análisis realizados por la Comisión y descritos brevemente aquí, se encuentran orientados hacia la formulación de alternativas de regulación y ajuste de las medidas vigentes en materia de calidad y en lo que concierne a las metodologías de medición en campo, teniendo en cuenta la realidad práctica de la recolección de muestras en ambos tipos de mediciones y

considerando las herramientas tecnológicas disponibles para su realización, así como las necesidades de información de los usuarios.

Radios digitales

Los radios digitales han transformado las comunicaciones inalámbricas. Al convertir señales analógicas a señales digitales, se permite una mayor eficiencia en la transmisión de datos, mejor uso del espectro y la implementación de técnicas avanzadas, tales como la modulación digital, la corrección de errores y la encriptación.

La estructura de los radios digitales está conformada por:

- Conversión de señales analógicas a digitales: Los radios utilizan un convertidor A/D para transformar las señales de RF analógicas en bits digitales. Esto facilita su procesamiento y transmisión a través de redes complejas.
- Modulación digital: Emplean técnicas como QAM, PSK o FSK, lo que permite un mejor uso del espectro. Se transmite más información por cada unidad de ancho de banda.
- Corrección de errores: Los radios digitales utilizan técnicas de corrección de errores (FEC, hamming, reed-Solomon) que mejoran la robustez frente a interferencias y pérdidas de señal.

A pesar de sus beneficios, los radios digitales presentan desafíos respecto a su implementación y operación. Estos son:

- Ruido/desvanecimiento: Las señales digitales están sujetas a problemas de desvanecimiento ocasionados por obstáculos o interferencias. Se producen pérdidas temporales de conectividad o degradación del servicio.

- Sincronización: En una red digital, la sincronización de tiempos es relevante. Las diferencias en la temporización entre transmisores y receptores pueden generar errores en la decodificación de la señal.
- Latencia y retardo de propagación. Los procesos de conversión y corrección de errores añaden cierta latencia a la comunicación.

Para abordar las situaciones expuestas, es fundamental realizar mediciones precisas en las redes de radios digitales. Entre ellas las siguientes:

- Pruebas de calidad del servicio (QoS): Se evalúa el rendimiento del sistema en términos de latencia, ancho de banda, jitter y pérdida de paquetes para asegurar que se cumple con los estándares requeridos.
- Análisis de espectro: Se utilizan analizadores de espectro para identificar interferencias y ajustes de frecuencias de operación para minimizar el ruido.
- Pruebas de BER: Mide tasa de errores en la transmisión digital, lo cual es importante para determinar la robustez del sistema en un entorno real.
- Uso de herramientas de simulación en software. Son herramientas específicas que permiten modelar y prever el rendimiento del sistema ante diferentes condiciones.

Conceptos básicos de medición RF:

Se deben comprender los términos: Frecuencia, amplitud, modulación y espectro RF.

- Frecuencia: Número de ciclos por segundo de una onda de RF. Se determina la longitud de onda, velocidad y energía.

- Amplitud: Es el desplazamiento máximo que experimenta un punto de una onda respecto a la posición de equilibrio. Medida en voltios (v) o decibeles (dB).
- Modulación: Proceso que consiste en modificar la frecuencia, amplitud o fase de una onda de RF para codificar la información. Puede ser analógica o digital. Existen diferentes tipos: AM, FM o PM.
- Espectro electromagnético: Rango de frecuencias que ocupan la totalidad de las ondas. Medido en Hertz.

Bandas de frecuencias del espectro electromagnético:

Dentro del espectro electromagnético se pueden asignar diferentes bandas de acuerdo a su aplicación y contenido.

Espectro electromagnético (Yücek & Arslan, 2009)

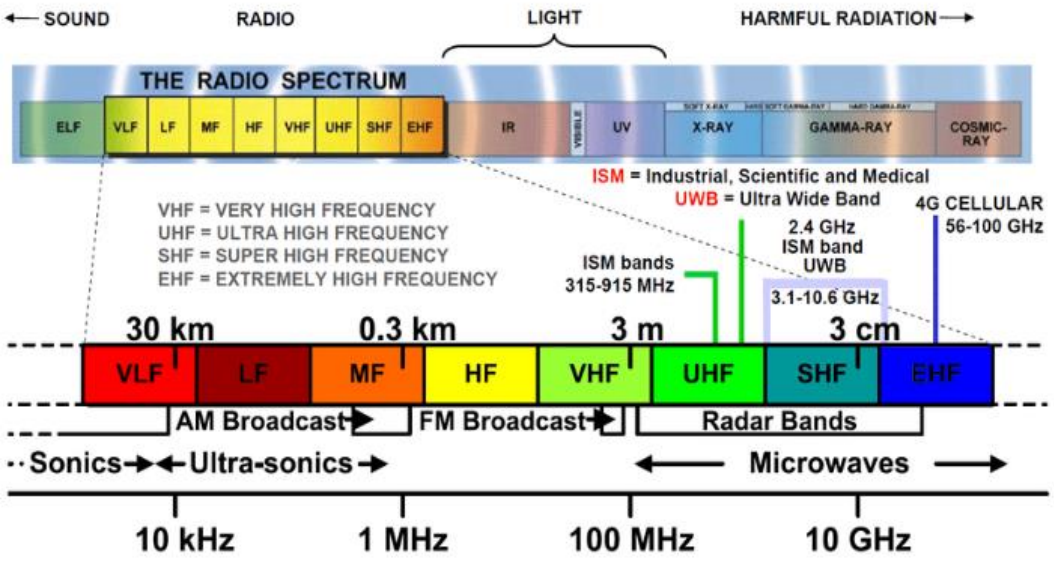


Fig. 1 Gráfica de frecuencias del espectro electromagnético

Instrumentos utilizados para medición de RF: Los instrumentos generan, reciben y procesan señales. Son utilizados para calibrar, probar, simular dispositivos o sistemas de RF.

- **AE:** Mide y muestra en una pantalla el espectro de frecuencia de una señal. Su finalidad es identificar, caracterizar señales y primordialmente para monitorear y solucionar problemas.
- **Medidor de potencia:** Mide la potencia de una señal para verificar o monitorear el rendimiento de un equipo de comunicaciones.
- **Medidor de BER:** Mide la tasa de error. Certifica calidad, confiabilidad e integridad de una transmisión de datos.
- **Medidor SNR:** Relación señal a ruido. Mide la claridad, fidelidad o sensibilidad de una señal de RF detectada.
- **Contador de frecuencia:** Mide con precisión la estabilidad o desviación de frecuencias en módulos de una red (RF/audio).
- **Osciloscopio:** Muestra la forma de onda de una señal de (RF/audio). Mide, depura la forma, la fase o distorsión de una señal.

Imágenes de instrumentos utilizados para mediciones de RF:



Fig. 2a Sensor de potencia OTA



Fig. 2b Frecuencímetro TF900



Fig. 2c Generador de funciones 4050



Fig. 2d Osciloscopio GDS 2000



Fig. 2e Analizador de espectro Peak Tech



Fig. 2f Medidor BER Agilent

Teoría de la intensidad de campo eléctrico:

Introducción: Denominada SF (dB$\mathcal{M}$V/m). Es un campo de fuerza electromagnética, medida en decibeles dB y relativa a 1$\mathcal{M}$V/m.

Es una unidad de campo eléctrico que caracteriza la intensidad de energía de radio-frecuencia radiada por una estación transmisora. La amplitud de la señal emitida, se mide en los terminales de una antena debidamente calibrada con el fin de determinarlo.

Uno de los métodos utilizados consiste en el uso de un AE**.** Captura la amplitud de la señal detectada por la antena. Para cualquier ganancia (o atenuación externa), convierte automáticamente la amplitud de la señal en términos de intensidad de campo electromagnético (la

que fue irradiada por la estación transmisora). Utiliza el Factor de antena (referido como el factor K) y escala el campo eléctrico para la diferencia entre la distancia medida y la distancia de referencia requerida.

El AE 2715, realiza la corrección, conversión y escalamiento. Se ingresa la Ganancia (o atenuación), factor de antena y medición de distancia utilizando el menú de entrada. Se selecciona la unidad de referencia y el AE entrega la medición.

La intensidad de la señal es leída directamente sobre la pantalla usando el "Marcador", teniendo en cuenta las distancias. Entrega la medición en dB$\mathcal{M}$V/m o V/m. Utilizando el menú "display", se puede obtener en el AE un sonido de alerta si la señal medida excede el umbral. (debe ser colocado por el operador que realiza la medición). En la fig. 3 se muestran conexiones del equipo.

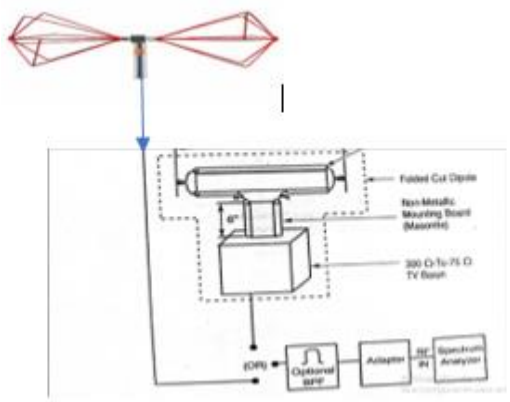


Fig. 3 Configuración del equipo para mediciones de intensidad de campo

Un acoplador de impedancias "balum". puede ser incluido como parte de la antena, de igual manera el filtro y la red externa acoplada. El kit es necesario para obtener una medición segura. El filtro tiene como finalidad, evitar señales que estén presentes en el momento de la medición

(señales de radio y/o TV) que puedan saturar al AE**.** En caso de duda, se realiza la medición con y sin la red externa. Si no hay diferencia se omite la red de máxima sensibilidad.

Procedimiento matemático:

La siguiente fórmula relaciona el SF radiado, relativo a 1$\mathcal{M}$V/m a la amplitud de señal, medido en dBs relativo a 1 mV (dBmV) y escala el resultado medido a una distancia d**,** medida a una distancia referencia d ref.

La distancia referencia es a menudo especificada por las agencias reguladoras.

P(dB$\mathcal{M}$V/m) = P (dBm) + 13 + 20 log [$\frac{dmeas}{dref}$] – A + K [Ec. 1]

$dmeas$ = Distancia desde la fuente de radiación a la cual la medición es llevada a cabo.

$dref$ = Distancia referencia a la cual la intensidad es deseada.

A = Atenuación o Ganancia entre la antena y el AE. Si el filtro es usado, su Ganancia o Atenuación será incluida. Si en el balum hay pérdidas, serán incluidas en el parámetro Factor de antena. Al igual pérdidas en cables si son significativas.

K = Factor de antena, es suministrado por el fabricante de antena o será calculado como se explica a continuación:

K = 20 log f - G 10 log [19 x R antena] [Ec.2]

G = Ganancia de antena en función de la frecuencia.

f = Frecuencia de la señal en MHZ.

R antena = Resistencia de salida de antena o del balum (si es parte del kit de antena).

Mediciones con AE (matemática):

Para convertir la lectura de voltaje recibido (Vr) del AE en su respectiva intensidad de campo (E), es necesario multiplicarla por una constante de proporcionalidad (K) que recibe el nombre de Factor de antena. En general es ventajoso contar con la expresión:

E = KV (en forma logarítmica). Por lo tanto:

20 logE = 20 log (KVr) [Ec.3]

E (dB$\mathcal{M}$V/m) = K(dB/m) + Vr (dB$\mathcal{M}$V) [Ec.3a]

Cálculo del factor de antena K

Partiendo de "Densidad de antena (Vector de Poynting)" en función de la potencia transmitida es:

P = $Pt \ / \ 4\pi r^2$ [Ec.4]

P = Densidad de potencia $W \ / \ m^2$

Pt = Potencia transmitida W

R = Distancia en m.

La relación entre la intensidad de campo y la densidad de potencia está dada por:

E = $\sqrt{120\pi P}$ [Ec.5]

E = Valor efectivo de la intensidad de campo V/m

P = Densidad de potencia $W \ / \ m^2$

120 = Impedancia de espacio libre en Ω (120π).

El área efectiva de una antena de recepción está definida por:

Ar = $G\lambda^2/_{4\pi\lambda}$ [Ec. 6]

Ar = Área efectiva de recepción en m^2

G = Ganancia lineal de la antena (Sin unidades)

Determinamos la potencia recibida por la antena, multiplicando la densidad de potencia por el área efectiva de la antena:

Pr = P Ar = $PG\lambda^2 \ / \ 4\pi$ $[Ec. 7]$

Pr Potencia recibida en W

P = Densidad de potencia $W \ / \ m^2$

G = Ganancia lineal de la antena (Sin unidades).

λ = Longitud de onda en m.

Despejando P de (3):

P = E^2 /120π ; Reemplazando en (5):

Pr = P$G\lambda^2 \ / \ 4\pi$ = E^2/120π $[G\lambda^2 \ / \ 4\pi]$

Pr = $E^2 G\lambda^2 \ / \ 480\pi^2$ $[Ec. 8]$

De otra parte y de acuerdo con la ley de Ohm:

Pr = $Vr^2 \ / \ Zo$ [Ec.9]

Vr = Voltaje recibido en voltios

Zo = Impedancia de entrada del receptor en Ω.

Igualando las ecuaciones: [Ec.8] y [Ec.9]

$Vr^2 \,/\, Zo \;=\; E^2 G\lambda^2 \,/\, 480\pi^2$; despejando E^2:

$$E^2 = 480 Vr^2 \pi^2 \,/\, \lambda^2 ZoG \qquad \text{[Ec.10]}$$

Reemplazando λ en [Ec.10] ; $\lambda = {}^{C}/_{f\ Mhz.}$

$${}^{\mathrm{E}}/_{Vr} = {}^{\pi \mathrm{f}}/_{75} \sqrt{{}^{30}/_{ZoG}} \qquad \text{[Ec.11]}$$

$E^2 = 480 Vr^2 \pi^2 \,/\, \lambda^2 ZoG$ [Ec.10]

Reemplazando λ en [Ec.10] ; $\lambda = {}^{C}/_{f\ Mhz.}$

${}^{\mathrm{E}}/_{Vr} = {}^{\pi \mathrm{f}}/_{75} \sqrt{{}^{30}/_{ZoG}}$ [Ec.11]

K = E/V

$$K = {}^{\pi \mathrm{f}}/_{75} \sqrt{30/ZoG} \qquad \text{[Ec.12]}$$

Convirtiendo [Ec.12] a forma logarítmica:

$K^2 = [\pi^2 f^2 \,/\, 75^2]\, [\, {}^{30}/_{ZoG}\,]$ por tanto:

K^2 = f^2/19ZoG Aplicando logaritmos:

10 log K^2 = 10 log [f^2 / 19ZoG]

20 log K = 20 logf - 10 log G – 10 log Zo – 10 log 19

K(dB/m) = 20 log f (Mhz) – G (dB) – 10 log Zo – 12.78 dB [Ec.13]

Cuando la impedancia del receptor es 50 Ω, entonces Ec.13] se transforma en:

K(dB/m) = 20 log f (Mhz) – G (dB) – 29.78 dB [Ec. 14]

Cuando la impedancia del receptor es 75 Ω, entonces Ec.13] se transforma en:

K(dB/m) = 20 log f (Mhz) – G (dB) – 31.54 dB [Ec.15]

Utilizando el procedimiento anterior es posible calcular el factor de antena K y calibrar el AE para determinar la intensidad de campo en el punto donde se encuentra la antena de recepción.

En conclusión, los pasos a seguir para convertir los dBm indicados en el AE a intensidad de campo son:

1. Convertir los dBms a dB $\mathcal{M}$**V** de acuerdo con:

dB $\mathcal{M}$V = dBm + 107

2. Calcular K en dB/m
3. Sumar 1 y 2.

Por lo tanto, para un sistema de 50 Ω y de acuerdo con [Ec.1]:

E(dB$\mathcal{M}$V/m) = Vr (dBm) + 107 + 20 log $f(Mhz)$ – G (dB) + 29.78 dB

Reduciendo para un sistema de 50 Ω:

E(dB$\mathcal{M}$V/m) = Vr (dBm) + 20 log $f(Mhz)$ – G (dB) + 77.22 dB [Ec.16]

Reduciendo para un sistema de 75 **Ω**:

E(dB$\mathcal{M}$V/m) = Vr (dBm) + 20 log $f(Mhz)$ – G (dB) + 75.46 dB [Ec.17]

Tabla 1. Conversión para impedancia de entrada 50 Ω:

Conversión	dBm	dBV	dBmV	dB$\mathcal{M}$v
dBm	0	-13	47	107
dBV	13	0	60	120
dBmV	-47	-60	0	60
dB$\mathcal{M}$V	-107	-120	-60	0

Tabla 2. Conversión para impedancia de entrada 75 Ω

Conversión	dBm	dBV	dBmV	dB$\mathcal{M}$v
dBm	0	-11.25	48.7	108.7
dBV	11.25	0	60	120
dBmV	- 48.75	-60	0	60
dB$\mathcal{M}$V	-108.75	-120	-60	0

Fórmulas de conversión:

Relación de Potencias: dB = 10 log [P1/P2] [Ec.18]

Relación de voltajes: dB = 20 log [V1/V2] [Ec.19]

mW a dBm: $dBm = 10 \log (mW)$ [Ec.20]

dBm A mW: $mW = log^{-1}(^{dBm}/_{10})$ [Ec.21]

Tabla 3. Tabla de conversión de unidades

Conversión	**dBm**	**dB$\mathcal{M}$V**	**dBmV**	**dB$\mathcal{M}$V**
mV	20 log (mV)			
$\mathcal{M}$V		20 log [$\mathcal{M}$V]		
dBmV	$10\log[10^{^{dBmV}/_{10}}/_{Z.1000}]$			
dBm			$10\log[Z.1000.10^{dBm/10}]$	
dBmV				dB mV + 60
dBm				dBm +90+10 log Z

Medición Práctica de campo eléctrico:

Aunque las mediciones usualmente se realizan con un medidor de campo eléctrico en puntos geográficos asignados, un AE también puede ser utilizado.

El modelo 2715, con su "decibel" incorporado, relativo a $\mathcal{M}$V/m (dB $\mathcal{M}$V/m), posee la ventaja de estar dispuesto para corregir factores de antena, ganancias externas o atenuaciones y

mediciones a distancia. La aproximación general consiste en medir la amplitud de la señal del canal de interés, usando una antena acoplada apropiadamente al AE y orientada horizontalmente. Así:

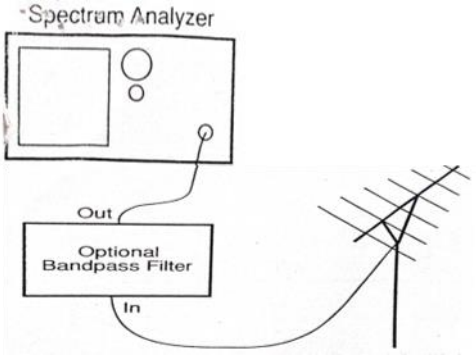


Figura 4 Conexión antena AE. Tomado de HP (1999)

Para lograr los mejores resultados cuantitativos, una antena fabricada comercialmente, calibrada y sintonizada a la frecuencia de la estación transmisora, podría ser utilizada. En caso de no estar disponible, es posible ensamblar una antena dipolo bifilar "plegada/300 Ω". Medir las "pérdidas por retorno" de la antena, con el fin de asegurar si está sintonizada a la frecuencia deseada (frecuencia de la estación transmisora). Como medida práctica, la antena debe ser localizada lejos del piso y de otros conductores. Debe utilizarse un soporte de antena no metálico.

Como precaución, debe tenerse en cuenta: "En la proximidad del transmisor, la señal detectada por la antena puede ser suficientemente grande y puede causar daño al AE".

El campo eléctrico en dBs, relativo a 1 $\mathcal{M}$V/m es:

P dB$\mathcal{M}$V/m = P dBm + 107 – A + K [Ec.22]

P dBm = Medición en el AE en dBm.

A = Atenuación externa o Ganancia.

K = Factor de antena, suministrada por el fabricante.

En la mayoría de AE, se puede realizar la medición en dBm y se procede a adicionar los otros términos al resultado de la medición.

Procedimiento

Set del equipo:

Es posible que el filtro de paso de banda "opcional", no sea necesario para las mediciones. Se utiliza para evitar que las estaciones en servicio cercanas, afecten al AE y sobrecarguen al primer mezclador. Si se utiliza, debe asegurarse que el filtro esté configurado a la frecuencia portadora. Adicionalmente, tener en cuenta su ganancia o atenuación.

Configurar AE:

a. Frecuencia central: Portadora visual.
b. Frecuencia Span/div: .5 o 1 Mhz.
c. Resolución: BW: 300 Khz.
d. Disparo: Free run.
e. Modo display: Peak.

Mientras se observa el nivel de portadora, debe girarse e inclinarse lentamente la antena para alcanzar el máximo de nivel de amplitud. Medir en el AE el nivel de portadora.

- Adicionar 107 al resultado.
- Sustraer cualquier atenuación o ganancia (entre la antena y el AE si es el caso). A es negativa en caso de atenuación y positiva en caso de ganancia.
- Adicionar el factor de antena K, a la frecuencia portadora (debe ser positiva o negativa). "La red acoplada que forma parte de la antena, generalmente se incluye en el factor K. El resultado es el campo eléctrico buscado.

- En el AE 2715, se puede ingresar la Ganancia/Atenuación externa y la tabla Factor de antena en memoria, usando el menú Input.

Se puede escalar la medida a una distancia específica desde el transmisor. El (los) resultado(s), puede(n) ser entonces leído(s) directamente sobre la pantalla del AE en dBmV/m.

El proceso es sencillo. Se requieren instrucciones específicas del instrumento de medición que se va a utilizar. Ventaja: Se pueden realizar mediciones a un número de frecuencias y puntos geográficos sin riesgo de errores aritméticos.

Medición de Pérdidas por retorno:



Fig. 5 Analizador de Espectro

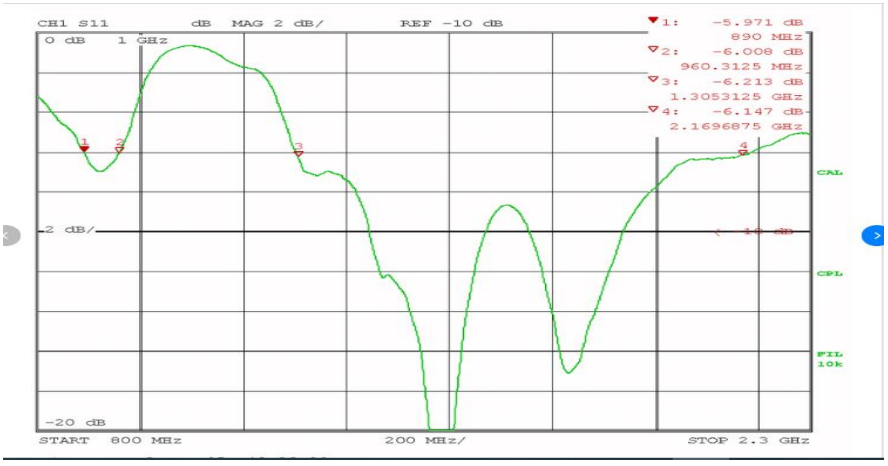


Fig. 6 Pérdidas por retorno simuladas

Las mediciones de pérdida por retorno son tomadas para asegurar la integridad del subsistema TX, incluyendo la antena, el alimentador de la línea de TX y todos los conectores RF. En sistemas de antena múltiple, las pérdidas de retorno de cada trayecto de TX deben probarse individualmente, entonces las pérdidas de retorno de la línea del subsistema de TX completa, son "Probadas" (incluyendo divisores y atenuadores).

Para sistemas que incluyen antenas de red y OMNI, la pérdida por retorno general < -18 dB es aceptable, mientras que para sistemas que incluyen antenas de panel menos eficientes, una pérdida de retorno < -14 dB es aceptable. Las pérdidas de retorno se realizan en un rango de frecuencias que abarquen tanto la frecuencia de TX como la de RX.

Así, para frecuencias de TX y RX de 1435,75 y 1484.75 respectivamente, la prueba de la banda de frecuencia podría comenzar en 1430 MHZ y terminar en 1490 MHZ. Sin embargo, solo son de interés las mediciones de pérdida de retorno en las frecuencias de TX y RX.

La pérdida de retorno es la relación entre la potencia reflejada dividida por la potencia transmitida, medida en dB. Se utiliza como indicador de la calidad del subsistema de la línea de TX, incluidas antenas cualesquiera, divisores u otros dispositivos que puedan estar instalados en el

camino de transmisión. Generalmente, cuanto menor o más negativa sea la medición de la pérdida de retorno, mejores serán las características de reflexión y transmisión del subsistema línea de TX. Esto es, una pérdida de retorno de -25 dB es mejor que una pérdida de retorno de -12 dB.

Una pérdida de -15 dB significa que aproximadamente el 97% de la energía está siendo transmitida y el 3% se refleja en los radios.

La matemática que describe la pérdida de retorno y la eficiencia de transmisión se describe a continuación. La tabla 4 proporciona una comparación de referencia entre los valores de potencia de transmisión en dBm y en watts.

Pt(dBm) = 10 log10 $[Pt\ w\ ] + 30$ [Ec.23]

0 dBm = 1 mW

Pérdidas por retorno dB = Relación de potencia reflejada con respecto a la potencia transmitida. Esto es,

10 log10 = $[\frac{Potencia\ reflejada\ w}{Potencia\ \ TX\ w}]$ [Ec.24]

Pérdidas por retorno dB = Potencia reflejada dBm - Potencia transmitida dBm

0 < Potencia reflejada dBm < Potencia transmitida dBm

% Potencia transmitida w = $[\frac{P\ transmitida - Potencia\ reflejada}{Potencia\ transmitida}]$ x 100 % [Ec.25]

% Potencia transmitida = [1 - $10^{Return\ loss/10}$] x 100 % [Ec.26]

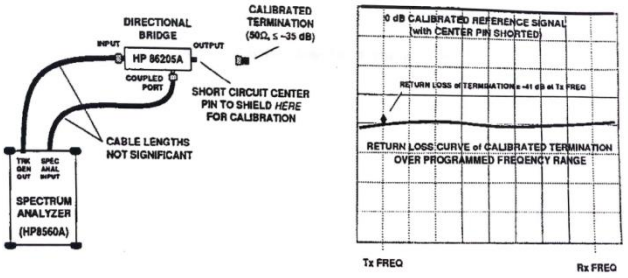


Fig. 7 Set up de calibración

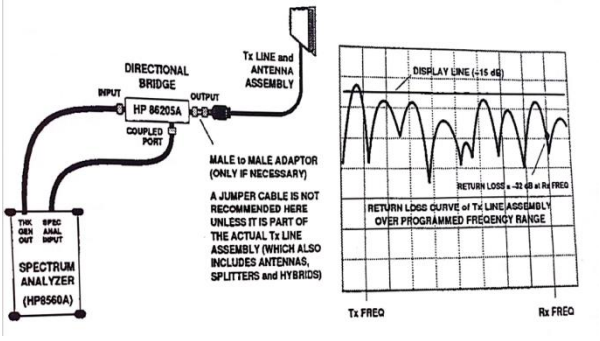


Fig. 8 Set up Medidas de Pérdidas por retorno

Tabla 4 Relaciones entre diferentes unidades de potencia tx y entre pérdida de retorno y eficiencia de transmisión.

Potencia tx dBm/Watts	**Pérdidas por retorno dB**	**Pot tx %**
0/.100	0	0
5/.300	-2	36.9
10/.100	-4	60.1
12/.160	-6	74.8
14/.250	-8	84.1
16/.400	-10	90.0
18/.630	-11	92.0
20/.100	-12	93.6
22/.158	-13	94.9
24/.251	-14	96.0
26/.398	-15	96.8
28/.631	-16	97.4
30/1.000	-17	98.0
31/1.259	-18	98.4
32/1.585	-19	98.7
33/1.995	-20	99.0
34/2.512	-21	99.2
35/3.162	-22	99.3
36/3.981	-23	99.4
37/5.912	-24	99.6
38/6.310	-25	99.6

Mediciones BER:

Mide la calidad de una transmisión digital en sistemas de telecomunicaciones (tasa de error en bits) . Es la probabilidad de que un bit transmitido a través de un canal de comunicación sea recibido de manera incorrecta, debido a los efectos de ruido, distorsión, interferencia u otros problemas inherentes al sistema.

La prueba BER, verifica el rendimiento de una red y se realiza para llevar a cabo la activación del servicio para un usuario. La prueba BERT constituye una forma eficaz de garantizar la integridad global de la red. Teóricamente:

$$BER = Pe \qquad [Ec.27]$$

Pe es la probabilidad de error de bit. Depende de varios factores tales como el tipo de modulación, la relación Señal/ruido (SNR) del canal y del tipo de canal.

Canal sin ruido (ideal): En un canal perfecto, BER = 0. Todos los bits se reciben correctamente.

Canal con ruido**:** Para canales con ruido aditivo blanco gaussiano (AWGN), el BER teórico para esquemas de modulación como BPSK se calcula como:

$$\mathrm{BER} = Q[\sqrt{\frac{2Eb}{No}}] \qquad [Ec.28]$$

Qx = función Q (Probabilidad en la cola de una distribución normal)

Eb = Es la energía por bit.

No = Densidad espectral de ruido

Para esquemas más complejos como QPSK, QAM, PSK de mayor orden, la fórmula de BER varía, pero sigue dependiendo del SNR.

Si la tasa de errores es suficientemente confiable, se puede expresar como una probabilidad (Pe) de errores que se pueden producir a futuro. Un comprobador de la tasa de errores de bits eficaz, puede realizar pruebas de activación de servicios en torno a diversos indicadores de rendimiento (KPI).

Es un escenario donde la demanda de ancho de banda y rendimiento de las redes Ethernet crece día a día, las pruebas de la tasa de errores de bits (BERT) han cobrado importancia vital a la hora de medir la tasa de errores de bits (BER) en los canales de comunicación de FO. Se genera confianza en la activación de servicios de alta velocidad.

Llevar a cabo estas pruebas en las redes internas puede garantizar que las operaciones sean eficaces y fluidas, especialmente cuando se implementan circuitos de gran tamaño con altos niveles de tráfico. Además, los clientes que adquieren redes de alta velocidad esperan un rendimiento impecable desde el primer día. Las BERT se pueden emplear para certificar el funcionamiento de las redes nuevas, con lo que se mejora el grado de satisfacción de los clientes.

Los errores de bits en las redes de FO pueden deberse a la atenuación, la dispersión y otras muchas causas, pero las rutinas de comprobación y corrección de errores de servicios Ethernet pueden enmascarar problemas físicos inherentes a la red, con lo que se podría concluir que las pruebas BERT no son necesarias para los enlaces de FO basados en Ethernet.

Los paquetes retransmitidos a partir de errores de bits pueden disminuir el rendimiento del procesamiento y contribuir inadvertidamente a los problemas de congestión.

Aunque pueda parecer que la red funciona de manera óptima, entre las posibles consecuencias de omitir las BERT, se incluye la falta de visibilidad en profundidad del rendimiento del sistema y que se desaprovechen oportunidades para realizar correcciones antes de la activación.

Se han implementado diversos métodos de activación de servicios y pruebas de la tasa de errores de bits para redes Ethernet, cada uno de ellos con ventajas y limitaciones intrínsecas. Mientras algunos procesos de pruebas son adecuados para determinadas aplicaciones, otros proporcionan una evaluación más general de la calidad del servicio (QoS) del enlace de red.



Fig. 9 Instrumento de medición BER

El proceso para realizar mediciones de BER en un sistema de telecomunicaciones implica varias etapas que garantizan la precisión y buen desempeño del sistema a evaluar (red móvil, enlace satelital, fibra óptica). Se determina el BER objetivo para el sistema según estándares de calidad.

BER (promedio de bits errados)**:** Es la proporción de bits recibidos con errores respecto al total de bits transmitidos. Se utiliza para evaluar la calidad del enlace en sistemas digitales.

Fórmula básica

$$\text{BER} = \frac{Número\ de\ bits\ erroneos\ detectados}{Número\ total\ de\ bits\ transmitidos}$$

Configuración del equipo:

El Transmisor: Genera un patrón de bits conocidos:

a. PRBS (Secuencia binaria falsa-aleatoria): Simula datos reales.
b. Alternancia de 0s y 1s: Prueba la respuesta del sistema a transiciones.
c. Patrones definidos por estándares: Como los usados en DVB-T, LTE o 5G.

El Receptor: Se configura para capturar y comparar la señal recibida con respecto a la original.

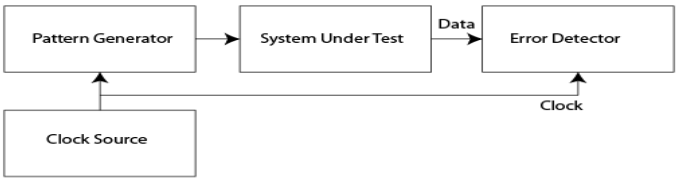


Fig. 10 Diagrama de bloques para una medición de BERT

Realizar medición BER:

- Transmitir el patrón de prueba.

a. Se activa el generador para enviar la señal a través del sistema.
b. Debe asegurarse que el sistema esté operando dentro de parámetros normales. Capturar la medida recibida.
c. El receptor compara la señal recibida con respecto a la señal originada (patrón de prueba).

d. Identifica y registra los errores de bits. Detecta los valores recibidos que no coinciden con los enviados.

Registrar resultados: Se calcula BER usando la fórmula:

$$\text{BER} = \frac{Número\ de\ bits\ erroneos\ detectados}{Número\ total\ de\ bits\ transmitidos}$$

Si 100 bits erróneos fueron detectados en 10^6 bits transmitidos: BER = 1 x 10^{-4}

Interpretar resultados:

Verificar si el BER obtenido cumple con los límites definidos por estándares ITU, IEE o con el diseño del sistema.

- Se calcula la tasa de error de bits BER: Una vez que el instrumento de medición BER detecta los errores, calcula el BER dividiendo el número de bits erróneos detectados entre el número de bits total transmitidos.
- Se Interpretan los resultados: Los valores típicos de BER en sistemas óptimos suelen ser: 1 x 10^{-9}, 1 x 10^{-12}
- Un valor bajo cercano a: 1 x 10^{-6} sugiere problemas en el canal de transmisión: Ruido, interferencia o atenuación. Esto indica que la señal en el sistema no está cumpliendo los estándares de calidad.

En redes ópticas BER = 10^{-12}

En redes inalámbricas BER = 10^{-9}

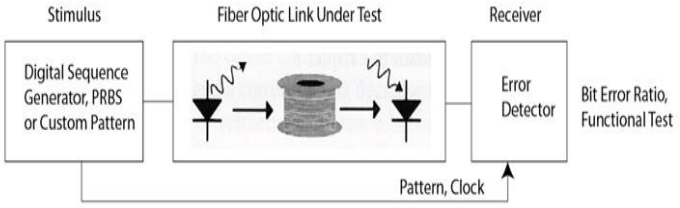


Fig. 10 a. Medición BER y prueba de bloques funcionales en un enlace FO

Equipos utilizados

- Medidores BER dedicados: Incluyen generadores de patrones y analizadores de errores.
- Osciloscopios digitales: Inspeccionan la calidad de la señal y la modulación en tiempo real.
- Software de análisis**:** MATLAB o LabVIEW permiten realizar simulaciones y análisis detallado de BER.
- Simuladores de canal: Agregan ruido, interferencias o atenuación.

Realización de la prueba

a. Conexión del equipo:

- Configurar el generador de patrones en el transmisor.
- Conectar el receptor y asegurarse de que el enlace esté operativo.

b. Transmisión del patrón**:** Envía una secuencia larga de bits (ej., 1 millón o más).

c. Medición de errores:

a. El receptor compara los bits recibidos con el patrón transmitido.

b. El equipo cuenta los errores y calcula el BER en tiempo real.

c. Ajuste del canal: Introduce ruido o interferencia para analizar la robustez del sistema.

d. ***Análisis de resultados****:*

Curva BER vs SNR**:** Graficar el BER en función de la relación señal-ruido para identificar el umbral de desempeño.

e. ***Generación de informe:***

Registrar los parámetros:

a. Potencia de transmisión.

b. SNR.

c. BER medido bajo distintas condiciones.

d. Comparar con los estándares o especificaciones del sistema.

Ejemplo práctico enlace LTE

1. Configurar un generador de PRBS y simular un canal con SNR de 20 dB.
2. Transmisión**:** Envía 10 millones de bits.
3. Medición**:** Detecta 500 bits erróneos.

4. Calcular usando la fórmula siguiente:

$$\textbf{BER} = \frac{500}{10.000.000} = 5 \text{ X } 10^{-5}$$

1. Equipo para DVB (Digital Video Broadcasting):

Rohde & Schwarz R&S ETL TV Analizer

- **Funciones:**
- Analiza señales DVB-T/T2, ISDB-T y ATSC.
- Realiza mediciones: BER, MER, SNR y análisis de espectro.
- **Ventajas:**
- Todo en uno (analizador de espectro + medidor de BER).
- Soporte para múltiples estándares de TV digital.
- Ideal para: Configuración y mantenimiento de transmisores DVB.

2. Equipos para LTE (4G)

Rohde & Schwarz CMW500 Wideband Radio Communication Tester

- Funciones: Medición de BER, latencia, y calidad de señal en LTE.
- Ventajas: Simulación de redes completas para pruebas exhaustivas.
- Ideal para: Verificación de dispositivos y equipos LTE.

Instrumento para medir Sistema 5G:

Anritsu MT8000A Radio communication test station.

- Funciones**:** Pruebas de BER y calidad de señal para FR1 y FR2.
- Compatible con NSA y SA.
- Ventajas**:** Soporte para frecuencias microonda
- Ideal para: Validación de dispositivos 5G.

Mediciones Jitter:

Mide la variabilidad del retardo de paquetes o señales en un sistema de transmisión. En redes IP y en general en cualquier red de paquetes, no es posible garantizar que todos los paquetes de una misma comunicación sigan el mismo camino (de hecho, lo más probable es que no lo hagan), al contrario de lo que ocurre en las redes de conmutación de circuitos. Como consecuencia, cada paquete llegará al destino atravesando un número distinto de nodos de la red y, por lo tanto, alcanzarán su objetivo con un retardo diferente. Estas variaciones de retardo reciben el nombre de jitter.

Para absorber estas variaciones se utilizan los llamados jitter buffers. Tienen la tarea de suprimir estas variaciones de retardo. La supresión consiste en el almacenamiento de los paquetes durante el tiempo suficiente para que los paquetes que han llegado fuera de secuencia puedan reordenarse y reproducirse en el orden correcto. Por tanto, cuanto mayor es el jitter de los paquetes, tanto mayor es el tamaño del buffer de supresión de jitter necesario para reducir su impacto en la calidad.

La supresión de jitter introduce un retardo adicional. Generalmente el tamaño del buffer de supresión de jitter es una solución de compromiso entre el retardo de los paquetes y la tasa de pérdidas, de manera que cuanto mayor es el tamaño del buffer, mayor es el retardo y menores las

pérdidas. Por esta razón, lo ideal es que el tamaño del buffer varíe dinámicamente con las condiciones de la red.

Diversos estudios han sido orientados para determinar los valores límites de jitter para aplicaciones en tiempo real. Se sugieren los siguientes:

QoS buena (0 ms-20 ms). QoS aceptable (20 ms-50 ms) y QoS pésimo (<50 ms).

Calidad de servicio (QoS):

Es la variación en el tiempo en el que tardan los paquetes de datos en llegar a su destino. En redes digitales, idealmente los paquetes deberían llegar a intervalos constantes. Sin embargo, fluctuaciones causan que lleguen de forma irregular. Esto se debe a congestiones en la red (cuando múltiples dispositivos compiten por los recursos de la red o retransmisiones (si un paquete se pierde o está "corrupto", debe enviarse de nuevo, causando retrasos adicionales), inestabilidad en el ancho de banda o fluctuaciones en la capacidad de la red, especialmente en redes inalámbricas de baja calidad. En el caso de una video llamada, si algunos paquetes de datos de la imagen o audio llegan más tarde que otros, se apreciarán interrupciones o el audio se escucha entrecortado.

1. Como consecuencias, aparecen efectos en aplicaciones sensibles. En el VoIP, el audio sufre distorsión o cortes si los paquetes de voz llegan a intervalos inconsistentes. Un flujo de datos de video puede congelarse o se necesitaría un almacenamiento constante. Esto impacta en la experiencia del usuario. Resulta en una apreciación no satisfactoria. Especialmente en aplicaciones de tiempo donde la sincronización es crítica.

2. Para medir y analizar el jitter de manera precisa, es necesario utilizar herramientas que monitoreen las variaciones en los tiempos de llegada de los paquetes. Algunas herramientas a utilizar son las siguientes:

- Wireshark: Permite capturar tráfico de red y calcular el jitter basado en el tiempo de llegada de los paquetes en flujos UDP.
- IPerf: Ideal para probar y medir el jitter en conexiones punto a punto usando tráfico UDP, ya que estas conexiones son sensibles al jitter.
- Ping Plotter: Muestra una visualización de las fluctuaciones del jitter a lo largo del tiempo, lo que facilita la identificación de patrones o problemas intermitentes.

Notas: En el campo de la telefonía, la calidad del servicio fue definida por la UIT en 1994. Comprende las necesidades de todos los aspectos de una conexión, el tiempo de respuesta del servicio, pérdidas de señal, relación señal/ruido, diafonía, ecos, interrupciones, respuesta en frecuencia, etc. Se define como:

La totalidad de las características de un servicio de telecomunicaciones que determinan su capacidad para satisfacer las necesidades explícitas e implícitas del usuario del servicio.

Capacidad de ofrecer diferentes prioridades a las diferentes aplicaciones de los usuarios, o flujos de datos que garanticen un cierto nivel de rendimiento.

Efectos jitter y mediciones:

Los sistemas de transmisión digital pueden funcionar con una cantidad considerable de fluctuación. De hecho, se toleraría una mayor fluctuación de fase en la señal del programa representado por los dígitos. En este punto se examinan las razones que subyacen (que están por debajo) a esta separación de los efectos de la fluctuación de fase, la cantidad de fluctuación de fase que puede encontrarse en los diferentes sistemas de transmisión digital y cómo medir la fluctuación de fase en los sistemas de transmisión en serie.

La especificación de la fluctuación de fase en la norma para la señal de vídeo digital en serie es "la temporización de los flancos ascendentes de la señal de datos". Estará dentro de +- 0,25 ns

de la temporización media de los flancos ascendentes, determinada en un período de una línea". A partir de la primera publicación de la norma en febrero de 1992, hay una nota a la especificación que dice: "Esta especificación es tentativa con más trabajo en curso para determinar el método de medición". De hecho, tanto la especificación como su método de medición son objeto de trabajo del comité de ingeniería de SMPTE.

En la transmisión de componentes paralelos, las especificaciones de fluctuación de fase para la señal de reloj de 27 MHZ se establecen como "la fluctuación de fase cresta a cresta entre flancos ascendentes. Debe estar dentro de los 3 ns del tiempo medio del flanco ascendente calculado en al menos un campo" para NTSC compuesto, la especificación es de 5 ns.

Audio digital según el estándar AES I, es una señal en serie que es un múltiplex de muestras de dos canales de audio y algunos datos auxiliares. Para la televisión, la frecuencia de muestreo de audio preferida es de 48 KHZ. Se requiere bloqueo de reloj para video para VTR digitales. Hay 32 bits de datos asociados con cada muestra de audio, lo que produce una velocidad de datos de 2 canales (una transmisión en serie) de 3,07 Mb/s.

Dado que el esquema de codificación de canal (marca bifásica) inserta una transición para cada reloj, la velocidad de transición resultante de la señal en serie puede ser de 6,14 MHZ, lo que da un intervalo de unidad de diagrama ocular de 163 ns.

Para el audio AES, la especificación de fluctuación de fase es "las transiciones de datos se producirán dentro de +-20 ns de un reloj ideal sin fluctuación"

El ruido de fluctuación, los cambios de amplitud y otras distorsiones en la señal digital en serie pueden ocurrir a medida que es procesada por amplificadores de distribución, conmutadores de enrutamiento y otros equipos que operan con la señal exclusivamente en su forma serial. La

figura 11**,** muestra cómo la señal recuperada puede ser tan perfecta como la original si los datos se detectan con un reloj libre de fluctuación, siempre y cuando el ruido y la fluctuación no superen el umbral de los circuitos de detección (es decir, el ojo esté lo suficientemente abierto) los datos se reconstruirán perfectamente.

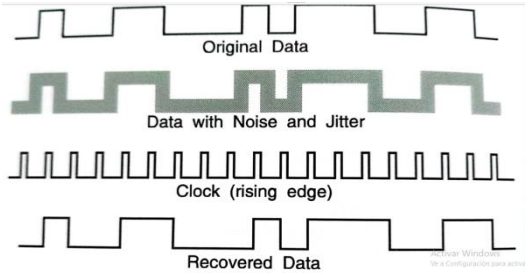


Fig. 11 Recuperación de datos con un reloj sin ruido

En un sistema práctico, el reloj se extrae del tren de bits en serie y contendrá parte de la fluctuación de fase presente en la señal. La fluctuación en el reloj puede ser una característica deseable en la medida en que la fluctuación ayuda a posicionar el borde del reloj en el centro del ojo. Se pueden tolerar grandes cantidades de fluctuación de fase de baja frecuencia en los receptores serie, si el reloj sigue las ubicaciones de apertura ocular (su posición varía con el tiempo).

En la figura 12 se muestra un ejemplo de sensibilidad a la fluctuación de fase del receptor, donde la línea continua representa la cantidad de fluctuación de fase que causaría errores de datos en el receptor. Para frecuencias de fluctuación bajas, las variaciones de ubicación ocular de hasta varios intervalos de unidad no anularán la extracción de datos.

A medida que aumenta la frecuencia de fluctuación de fase, la tolerancia del receptor disminuye a un valor de aproximadamente 0,25 intervalos unitarios. Los puntos de interrupción para esta curva de tolerancia dependen del tipo de circuito de bucle de bloqueo de fase utilizado en la extracción de reloj.

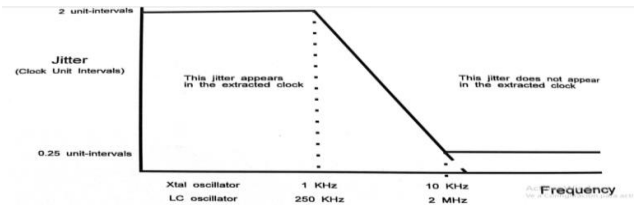


Fig. 12 Sensibilidad a la fluctuación de fase del receptor

En función de la aceptación de alguna fluctuación de fase en el reloj extraído (utilizado para recuperar los datos) se definen dos tipos de fluctuación.

1. La fluctuación de fase de temporización (o fluctuación de fase total) se define como la variación en el tiempo de los instantes significativos (por ejemplo, el cruce por cero) de una señal digital en relación con un reloj de referencia.

2. La fluctuación de fase de alineación (o fluctuación de fase relativa) se define como la variación en el tiempo de los instantes significativos (por ejemplo, el cruce por cero) de una señal digital en relación con un reloj recuperado de la propia señal.

Dado que los datos generalmente se recuperarán utilizando un reloj con fluctuación, la información digital resultante puede tener fluctuación en sus bordes de transición, como se muestra en la figura 13. Esta información sigue siendo completamente válida, ya que el procesamiento digital de la señal, solo considerará el valor alto/bajo en la mitad del período del reloj.

Sin embargo, si se utiliza el mismo reloj con fluctuación de fase (o un submúltiplo simple de la misma) para convertir la información digital en analógica, pueden producirse errores como se muestra en la figura 13.

Los valores de muestra convertidos a analógicos exactamente en los tiempos correctos, producirán una línea recta, mientras que el uso de un reloj con fluctuación, producirá una forma de onda análoga incorrecta.

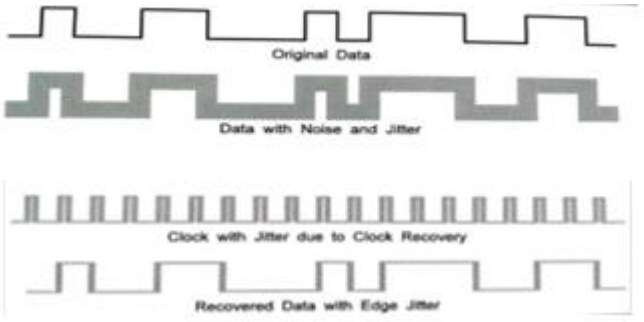


Fig. 13 Recuperación de datos con reloj extraído

Fluctuación de medición:

Existen tres métodos relacionados con el osciloscopio para medir la fluctuación de fase en una señal digital en serie. La medición de la fluctuación de fase de tiempo (o total) requiere un reloj de referencia libre de fluctuación, como se muestra en la parte superior de la figura 14. La fluctuación de fase (relativa) de alineación se mide utilizando un reloj extraído de la señal en serie que se está evaluando, como se muestra en la parte inferior de la figura 14.

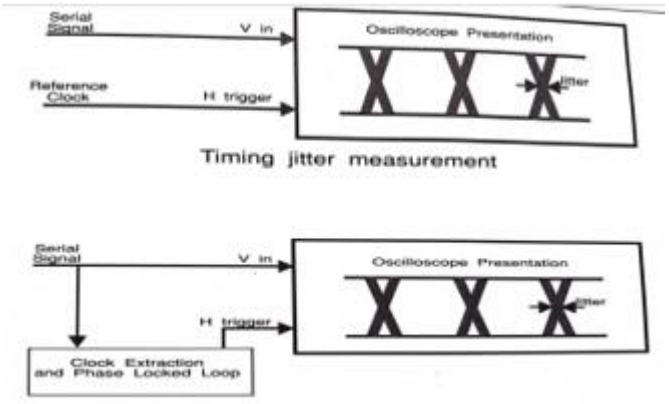


Fig. 14 Mediciones utilizando un reloj de referencia

Las mediciones de la fluctuación de fase de temporización incluyen esencialmente todos los componentes de frecuencia de la fluctuación de fase, tal como lo indica la línea discontinua que conduce a la línea continua en la fig. 15.

Los componentes de la frecuencia de fluctuación de fase medidos, utilizando el método de fluctuación de fase de alineación, dependerán de la anchura de banda del circuito de extracción del reloj. Los componentes de baja frecuencia de la fluctuación de fase no se incluirán porque el reloj extraído sigue la fluctuación de fase de la señal en serie. Estos componentes de fluctuación de fase de baja frecuencia no son significativos para la recuperación de datos, siempre que el sistema de extracción del reloj de medición, tenga el mismo ancho de banda que el sistema de extracción del reloj de recuperación de datos.

Todas las frecuencias de fluctuación de fase por encima de un determinado valor se medirán con puntos de interrupción entre las dos zonas a frecuencias apropiadas para la anchura de banda del sistema de extracción de reloj utilizado. Típicamente, se usaría un bucle de bloqueo

de fase que contiene un cristal u oscilador LC (a diferencia del extractor de reloj simple que se muestra en la fig. 15).

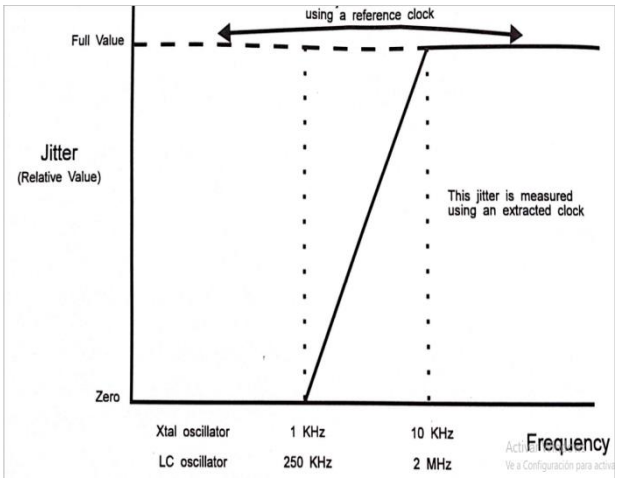


Fig. 15 Componentes de fluctuación de fase (Medidos)

Método de observación

El tercer método de observación de la fluctuación (pero sin medir), es la simple pero engañosa medición del osciloscopio. **S**e muestra en la figura 16.

Al activar internamente el osciloscopio en el borde ascendente (o descendente) de la forma de onda, es posible mostrar un patrón ocular en un tiempo retardado después del punto de activación.

Utilizando osciloscopios de muestreos digitales, se pueden obtener retardos largos con cantidades extremadamente pequeñas de fluctuación de fase, atribuibles a los circuitos de retardo en el osciloscopio.

A primera vista, esto parece una forma sencilla de evaluar el patrón de ojos, ya que no se requiere un circuito de extracción de reloj. El problema consiste en que los componentes de la

frecuencia de fluctuación de fase que se están midiendo, son una función del retardo de barrido utilizado y esa función es un filtro.

Como resultado, hay algunas frecuencias de fluctuación de fase que no se medirán y otras que indicarán un valor dos veces más alto de lo que se esperaría. Aunque hay un efecto de pasa-bajo en este tipo de medición, la forma del filtro es muy diferente de la que se obtiene con una aceleración de reloj extraído, por lo que los resultados pueden no ser una buena indicación de la capacidad de un receptor para recuperar los datos del tren de bits en serie.

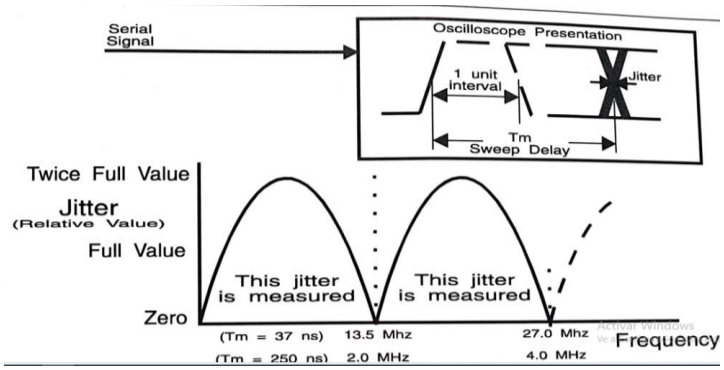


Fig. 16 Observaciones de fluctuación de fase auto-activadas

Concepto medición jitter: Es la fluctuación en el tiempo de llegada de paquetes o señales respecto a un intervalo ideal. Tipos principales:

- Jitter de transmisión: En redes de datos.
- Jitter de reloj: En sistemas de señalización digital.

Equipos utilizados:

a. Analizador jitter o de protocolos: Tektronik DPO/MSO.

b. Generador de patrones: Crea señales o paquetes con intervalos conocidos.

c. Osciloscopio digital: Monitorea y mide señales en sistemas digitales.

d. Software de medición de red: Wireshark, iPerf, Netflow analyzer para redes de datos.

e. Simulador de red: Prueba condiciones adversas. Cisco packet tracer o GNS3.

Configurar la prueba:

1. Identificar el sistema o enlace a probar:

Red Ethernet, enlace VoIP o una conexión de transmisión digital.

2. Definir parámetros de prueba:

- Intervalo de prueba para la medición.
- Tipo de tráfico a analizar: Continuo, ráfagas o tráfico en tiempo real.

3. Establecer herramientas de simulación o generación de tráfico:

Generar tráfico con intervalos uniformes para compararlo con tráfico recibido.

Realizar mediciones para red de datos IP:

- Transmitir paquetes de prueba:
- Usar herramienta Iperf o Wireshark.
- Generar tráfico constante con un intervalo de tiempo definido.

a. Capturar los paquetes recibidos:

- Monitorear los paquetes de llegada con respecto al tiempo esperado.

b. Calcular el jitter:

Fórmula básica: Jitter = |Ti+1−Ti|Jitter = |T_{i+1} - T_i|Jitte r = |Ti+1−Ti|

Donde TiT_iTi y Ti+1T_{i+1}Ti+1

son los intervalos de llegada de dos paquetes consecutivos.

Registrar valores máximos y promedio.

Tabla 5. Comparación de valores ideales

Comparación	**Tiempos**	**Herramientas**
Entorno	Jitter Ideal	Herramienta Sugerida
VoIP	< 30 ms	Solar Winds. Wireshark, iPerf
5G	1-10 ms (URLLC < 1 ms	EntornoR&S cmw500, Keysight Path wave. Viavi Cell Advisor

Estructura del método: De acuerdo con los autores: Téllez, Lezama y Sabogal (2014)

Metodología para realizar mediciones.

www.Dialnet-MetodologiaParaHacerMedicionesDeRadiacionElectroma-6041600.pdf

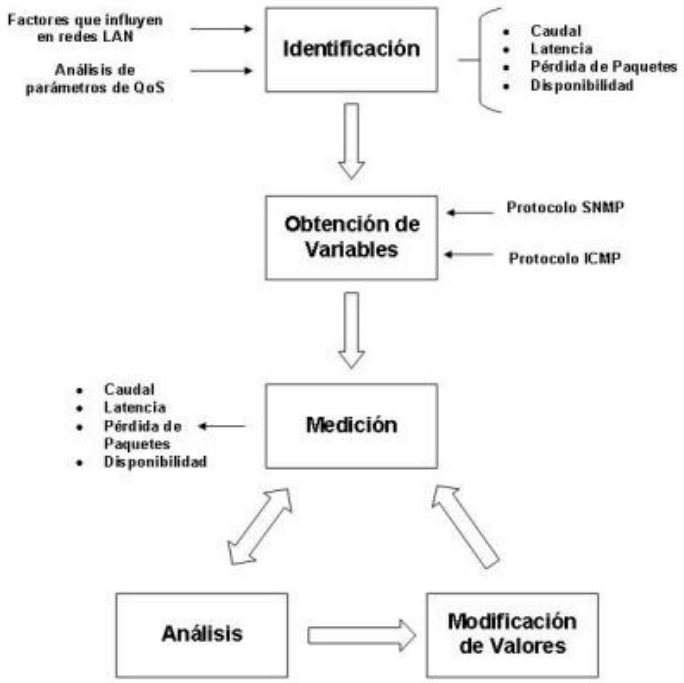


Fig. 17 Grafica estructura del método

Introducción QoS: En un sistema de telecomunicaciones, se requiere una alta tasa de bits, baja latencia, jitter, ancho de banda y baja probabilidad de paquetes perdidos. QoS es un parámetro de calidad del servicio que está siendo entregado. Las aplicaciones requieren óptimo nivel de rendimiento. Esto plantea un reto para el despliegue de las redes inalámbricas.



Fig. 18 Cuatro niveles de la calidad del servicio.

Retardo (Delay): Un paquete inicia su camino en un host (fuente), pasa a través de una serie de enrutadores y finaliza en otro host (destino). Un paquete viaja desde un nodo (host/enrutador) al nodo siguiente (host/enrutador). A lo largo de la trayectoria, sufre varios tipos de retardos. Estos son:

a. Retardo de procesamiento.

b. Retardo de colas.

c. Retardo de transmisión.

d. Retardo de propagación.

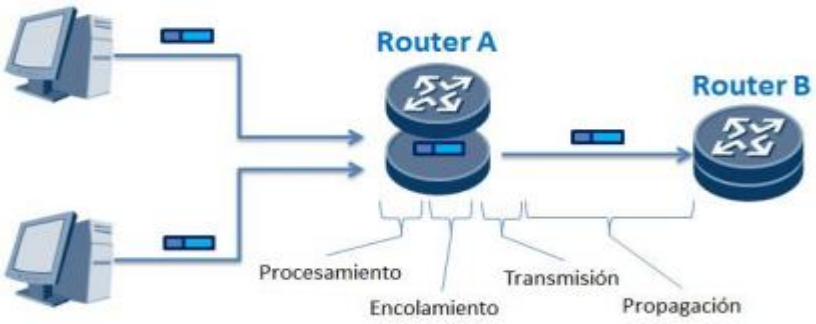


Fig. 19 Retardo del Nodo para el enrutador A.

Retardo de procesamiento: Es el tiempo requerido para examinar la cabecera del paquete y determinar el sitio de envío. El retardo de procesamiento incluye otros factores: Tiempo necesario

para verificar errores a nivel de bit en los paquetes que son recibidos por el enrutador A. Los retardos de procesamiento en enrutadores de alta velocidad son típicamente del orden de los microsegundos. Posteriormente, envía el paquete hacia la cola que antecede al enlace de transmisión hacia el enrutador B.

Retardo de cola: En las colas, el paquete experimenta un "retardo de cola". Queda en espera para ser transmitido a través del enlace. El tamaño de retardo de "colas en espera" de un paquete en específico dependerá del número de paquetes que hayan llegado antes., el retardo de "cola" será considerable. En la práctica los retardos pueden ser del orden de los microsegundos a milisegundos.

Retardo de transmisión: Asumiendo que los paquetes son transmitidos por orden de llegada, como es común en las redes de conmutación de paquetes, un paquete será transmitido solo después de que todos los paquetes que hayan llegado antes sean transmitidos.

Nota: Tamaño del paquete L bits. Tasa de transmisión del enlace desde el enrutador A hacia el enrutador B esté dada por R bps. Ejemplo: Para un enlace de 10 Mbps Ethernet, R = 100 Mbps. El retardo de transmisión es L/R, esta es la cantidad de tiempo requerido para transmitir todos los bits del paquete a través del enlace.

Retardo de propagación: Una vez un bit es empujado hacia el enlace, este necesita propagarse hacia el enrutador B. El tiempo requerido para propagarse desde el inicio del enlace hasta el enrutador B

es el retardo de propagación. El bit viaja a la velocidad de propagación del enlace, dicha velocidad depende del medio físico del enlace (FO, par trenzado, cable de cobre).

El retardo de propagación es la distancia entre 2 enrutadores dividido por la velocidad de propagación (d/v), donde d es la distancia entre los enrutadores A y B, v es la velocidad de propagación del enlace.

Una vez el último bit del paquete se propaga al nodo B, éste y todos los bits que lo precedieron son almacenados en el enrutador B. El proceso en su totalidad, continúa con el enrutador B realizando la transmisión. En una red WAN, el retardo de propagación es del orden de los milisegundos.

Latencia: La sección anterior, estaba enfocada en el retardo de un nodo en particular, es decir, de un solo enrutador, Considérese ahora un retardo total desde la fuente de información hasta su destinatario. La latencia consiste en la suma de los retardos parciales del camino que debe recorrer la información entre un punto y otro de la red, propios de la propagación de la señal en el medio de transmisión y del tiempo de procesamiento/conmutación en su paso por los diferentes nodos de la red.



Fig. 20 Latencia Extremo a Extremo en Internet Móvil.

La latencia es uno de los indicadores más utilizados para mostrar la calidad de una conexión. Esto se realiza habitualmente midiendo el RTT (Equivale al doble de la latencia) hacia un host

específico, utilizando la aplicación ping. Es importante recalcar que lo medido es la latencia del canal de comunicación. No incluye los tiempos de procesamiento de las aplicaciones a las que podría estar accediendo el usuario. Es decir, se podría obtener una latencia baja hasta el servidor aun teniendo un gran retardo producto de una aplicación lenta. Este último retardo no sería detectado en las mediciones. Este indicador no indica la percepción del servicio que experimenta el usuario.

Pérdida de paquetes: Se produce cuando uno o más paquetes de datos que viajan a través de una red informática no llegan a su destino. La pérdida de paquetes se distingue como uno de los 3 principales tipos de errores encontrados en las comunicaciones digitales, siendo los otros dos, errores en los bits y en los paquetes falsos originados debido al ruido.

La pérdida de paquetes puede ser causada por un gran número de factores que incluyen la degradación de la señal a través del medio de transmisión (desvanecimiento multi-trayectoria), descarte de paquetes debido a la congestión del canal: Paquetes corruptos rechazados en tránsito, hardware de red defectuoso, controladores de red defectuosos o rutinas normales de enrutamiento.

Una cola que precede a un enlace tiene capacidad finita. Depende en gran parte del diseño y costo del enrutador. Puesto que la capacidad de un enrutador es finita, es posible que un paquete llegue y encuentre la cola llena. Sin espacio para almacenamiento, el enrutador lo descarta y por lo tanto se pierde.



Fig. 21 Pérdida de paquetes en el enrutador A.

La fracción de paquetes perdidos incrementa con relación a la intensidad de tráfico. Por lo tanto, el desempeño de un nodo a menudo no solo se mide en términos del retardo sino también en términos de la probabilidad de pérdida de paquetes.

Un paquete perdido puede ser retransmitido en un sistema extremo “fin a fin” con el objetivo de asegurar que toda la información sea eventualmente transferida desde el origen hasta el destinatario.

La pérdida de paquetes en TCP genera que el flujo de datos decrezca abruptamente y disminuya el rendimiento de una conexión. Dependiendo del tipo de protocolo utilizado, la velocidad original se restablece lentamente. Por esta razón, es importante considerar el nivel de pérdida de paquetes que puede existir en una conexión. Debe ser medido y controlado. En la práctica se prefiere mantener la tasa de pérdidas en un nivel bajo de modo tal que los usuarios no vean afectado su servicio debido a la mala calidad del canal.

Tasa de descarga de datos: Adicional a los retardos y pérdida de paquetes, se considera la medida crítica de rendimiento en las redes de computadores. Es la tasa de descarga de datos o rendimiento. Consideremos una transferencia de un archivo desde el Host A hacia el Host B a través de una red de computadores.

El rendimiento instantáneo en cualquier momento, es la tasa (en bps) a la cual el host B está recibiendo el archivo. Si el archivo está compuesto por F bits y la transferencia toma t segundos para que el Host B reciba los F bits, el rendimiento promedio de la transferencia del archivo es de F/t bps.

Para algunas aplicaciones, tales como telefonía IP, es deseable tener un bajo retardo y un rendimiento instantáneo que esté constantemente sobre un cierto umbral (ejemplo: sobre 24 kbps para aplicaciones de telefonía IP y sobre 256 kbps para alguna aplicación en tiempo real). Para otras aplicaciones, incluyendo la transferencia de archivos, el retardo no es crítico, pero si es deseable mantener el rendimiento lo más alto posible.



Fig. 22 Rendimiento para transferencia de archivo cliente/servidor.

La figura 22 muestra una red con N enlaces, en donde R1, R2, … Rn son las correspondientes tasas de transferencia de cada uno de los n enlaces. Supongamos que los únicos bits siendo transmitidos en toda la red son dichos bits que van desde el cliente hacia el servidor. Por lo tanto, es posible establecer una analogía en la que los bits son un tipo de fluido y los enlaces de comunicación son ductos.

A un enrutador no se le puede inyectar una cantidad de bits a una tasa mayor que la tasa de transferencia del enlace que lo precede. De manera análoga, no se puede inyectar una tasa de

bits mayor que la del enlace que lo prosigue. La mínima tasa de transferencia de los enlaces Ri es la que introduce el cuello de botella. De esto resulta que el rendimiento extremo a extremo de una transferencia de un archivo de F bits, estará limitado por min {Ri} i ϵ [1, bps y a su vez el tiempo medio de transferencia será F/min {Ri}i ϵ [1,n] segundos.

Si la tasa a la que llegan datos a un enrutador es mayor que la tasa a la que este puede inyectarlos en el siguiente enlace, la cola de bits que están esperando a ser transmitidos, crecerá más y más. Es una situación indeseable. Si se sobrepasa la capacidad del buffer, el enrutador empezará a descartar paquetes.

En resumen, el rendimiento o tasa de transferencia, es la razón de datos entregados a un destino, medido en términos de bits por segundo y considera no sólo los bytes transmitidos sino también los erróneos, los retransmitidos y la información de control propia de la conexión. En una red móvil el rendimiento máximo que puede percibir el cliente depende no sólo de las aplicaciones a las que accede; también de las condiciones del enlace de radio y de la utilización que está realizando el grupo de usuarios que están compartiendo la celda. Se ve afectado el rendimiento a medida que el grupo de usuarios sea más intenso.

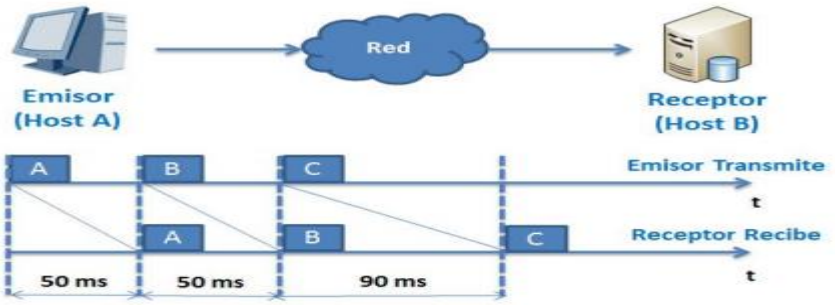


Fig. 23 Representación gráfica del Jitter

Simulación sugerida:

1. Configura una conexión UDP entre 2 puntos usando iPerf.
2. Generar tráfico a través de esa conexión y registrar las variaciones de tiempo en la entrega de los paquetes.
3. Visualizar los resultados para observar los cambios en el jitter.

Técnicas avanzadas:

3. Cálculo de la media y la desviación estándar del jitter: Estos valores son importantes para tener una idea clara de la estabilidad de la red.
4. Monitoreo continuo: Utilizar herramientas como Cisco IP SLA para configurar métricas automatizadas que midan el jittter y la latencia a lo largo del tiempo, permitiendo identificar cuando los problemas son puntuales o crónicos.

Ejemplo práctico avanzado:

1. Usar Wireshark para capturar el tráfico de una llamada VoIP.
2. Analizar los flujos RTTP y usar las estadísticas de jitter para ver cómo las variaciones impactan la llamada.
3. Ajustar la configuración QoS para analizar cómo mejorar el rendimiento.

Soluciones para mitigar el jitter:

- Buffers de Jitter: Los dispositivos de red, tales como enrutadores o “puentes”, pueden implementar buffers que almacenan temporalmente paquetes para reordenarlos antes de enviarlos al destino.
- Optimización del tráfico QoS: Configurar políticas de QoS para priorizar el tráfico sensible al jitter, como son las aplicaciones de voz y video.

- Monitoreo y ajuste continuo: Realizar pruebas de carga en la red para identificar cuellos de botella y ajustar el ancho de banda o rutas de transmisión según sea necesario.

Ejemplo práctico con simulación:

Objetivo: Mostrar cómo medir y mitigar el jitter en una red simulada.

- Configurar un laboratorio con herramientas como iPerf o Wireshark**.**
- Introducir Jitter en la red simulada generando alto tráfico o ajustando BW
- Realizar mediciones de jitter utilizando iPerf. Analizar los resultados Utilizando wireshrark.
- Implementar soluciones, tales como priorización del tráfico (QoS) o buffers de jitter y observar la mejora en la calidad de la red.

Comparación de las medidas jitter en el dominio de la frecuencia y tiempo:

Al analizar la robustez de los sistemas de transmisión de datos, el jittter es un indicador importante. Se recomienda utilizar instrumentos de medida jitter para los dominios de tiempo y frecuencia con el fin de diferenciar entre actividades de movimiento rápido o lento.

Objetivo: Medir el jitter con alta sensibilidad. El jitter aleatorio en el dominio temporal propaga la señal en el dominio de la frecuencia y puede interpretarse como modulación de fase involuntaria o ruido de fase. El ruido de fase en el dominio de la frecuencia puede medirse con una sensibilidad más alta que el jitter en el dominio temporal, utilizando el analizador de ruido de fase R&S/FSWP. Proporciona una sensibilidad inmejorable en las medidas de jitter, mientras que el osciloscopio

R&S/RTO es capaz de detectar el jitter de emisiones espúreas dinámicas (móviles o transitorias) o transitorias en el dominio temporal. Comparación de los resultados de medida:

Para la comparación se utiliza una señal de 1Ghz. con modulación de frecuencia a 1 MHZ y ruido añadido con un ancho de banda de 0 Hz. A 4 MHZ. Para una medida comparable, se elige el error de intervalo de tiempo (TIE) del R&S/RTO, porque ambos instrumentos rastrean el oscilador. Sin embargo, ya que los conceptos de medida de los instrumentos son distintos, existen diferencias entre los 2 analizadores. El R&S/FSWP integra varios ciclos de señal.

El R&S/FSWP es más adecuado para la medida del jitter aleatorio (RJ) y periódico (PJ), mientras que el R&S/RTO también puede detectar la distorsión del ciclo de trabajo y el jitter dependiente de los datos.

Tabla 6. Utilizada para mediciones jitter:

Parámetro	Barrido	RTO
Sensibilidad	< 5fs	600 fs(Ruido de fondo de jitter)
Detección de señales dinámicas	-	Detección con la función tracking
Max. frecuencia de entrada medible	Hasta 50 Ghz.	Hasta 6 Ghz
Desenlace	No	si
Medida cerca de portadora	.01 Hz	Limitada por la longitud máxima de registro.

La parte superior de la figura 24, muestra la traza medida del R&S/RTO como función de tracking (TIE vs. tiempo). El diagrama del centro muestra la FFT de la función de tracking. La FTT muestra el espectro del jitter con la PJ. El área bajo la curva corresponde al jitter total (TJ) de la señal. Los resultados se muestran en dBs. En la parte inferior, se muestra el histograma de la medida TIE.

En la figura 25, se visualizan los resultados de medida del R&S/FSWP en dBc (1Hz.). El R&S/FSWP también calcula el PJ de cada emisión espúrea, el PJ total y el RJ del espectro de ruido de fase en ps.

Para comparar los resultados, las unidades de ambas medidas se convierten a ps. Además, el jitter aleatorio del R&S/RTO y el jitter total del R&S/FSWP se calculan mediante: $TJ^2 = RJ^2 + PJ^2$

La tabla 7 muestra las medidas individuales y las diferencias. Los resultados del R&S/RTO y del R&S/FSWP son casi idénticos. Detectan la PJ a las mismas frecuencias y, la diferencia en sus valores es inferior a .5 ps. La diferencia entre los valores detectados de RJ y TJ es inferior a .5 ps. Esta buena correspondencia demuestra la comparación de los 2 instrumentos.

Tabla 7. Resultados comparativos de mediciones jitter:

Parámetro	Frecuencia	RTO	Barrido	Diferencia
Jitter periódico	1.0 Mhz	4.64 ps	4.63 ps	.01 ps
Jitter aleatorio (promedio)	-	7.34 ps	7.44 ps	.1 ps
Jitter total (Promedio)	-	8.68 ps	8.76 ps	.08 ps

Resumen:

El osciloscopio R%S/RTO y el analizador de ruido de fase R%S/FSWP miden con precisión y de forma comparable las señales de jitter (TIE): El R%S/RTO en el dominio temporal, y el R&S/FSWP en el dominio de la frecuencia. El R&S/RTO ofrece más capacidad con resultados adicionales como

son, el ciclo de trabajo o jitter dependiente de los datos y el análisis de señales transitorias rápidas con sensibilidad limitada. El R&S/FSWP ofrece una fácil separación del jitter periódico y del aleatorio a una sensibilidad inmejorable. El R&S/RTO y el R&S/FSWP se complementan bien y representan una solución ideal para medición de jitter.

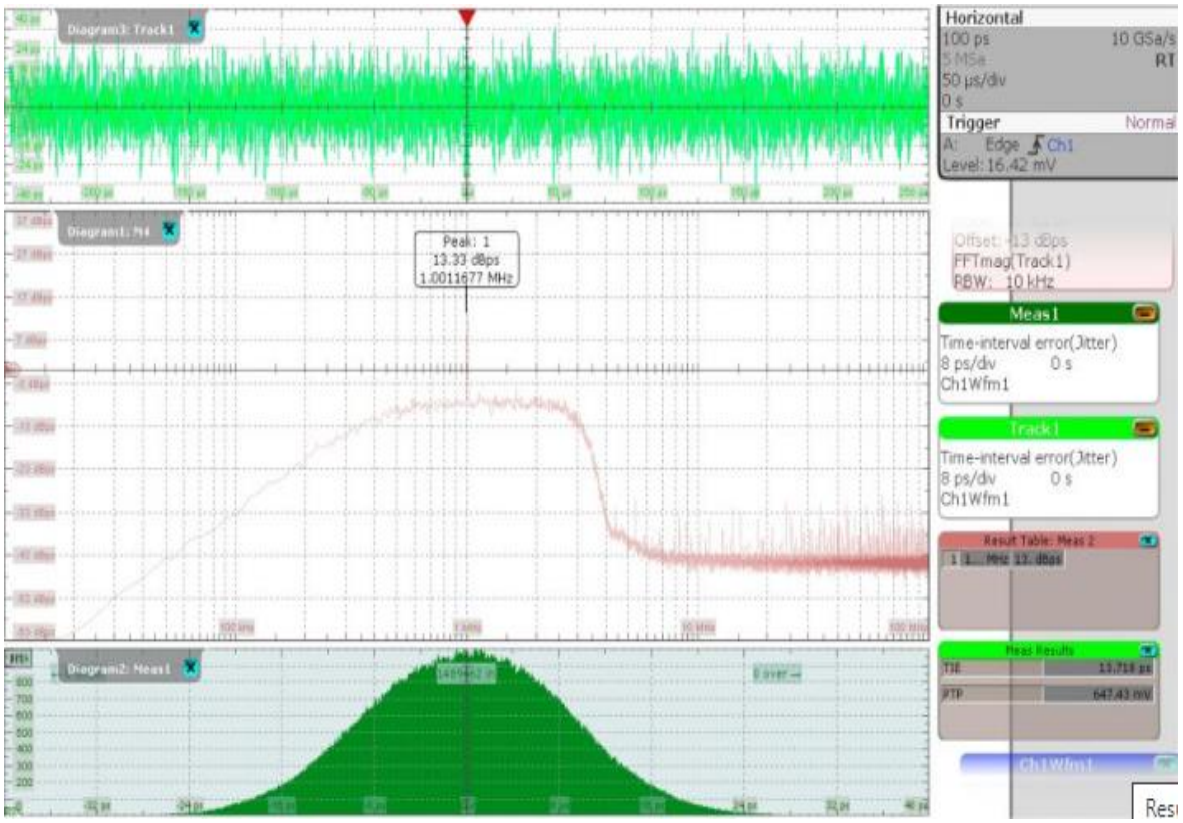


Fig. 24 Resultado de medición con el osciloscopio R&S RTO

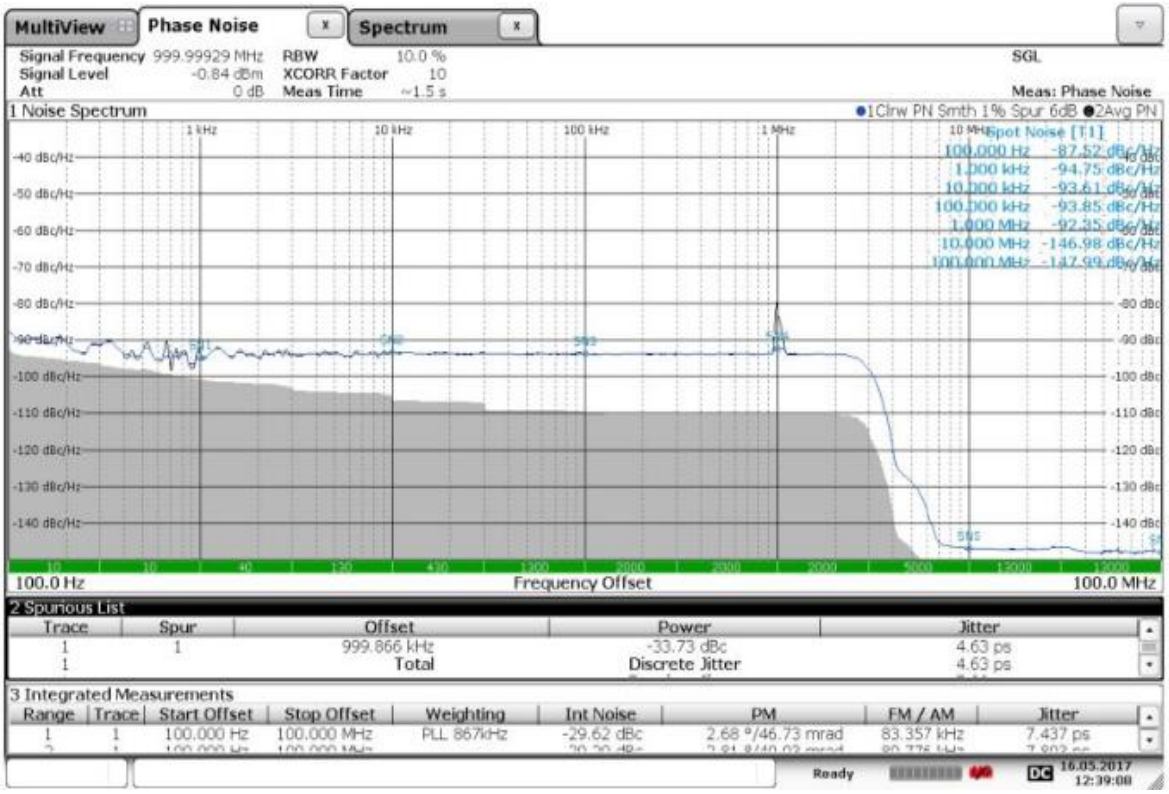


Fig. 25 Resultado de medición con un analizador de ruido de fase R&S FSWP

Es importante el jitter en la transmisión de datos y el impacto sobre los estándares de calidad de la red. Principalmente impacta los servicios en tiempo real: VoIP, video conferencias, transmisión de video. La calidad y la puntualidad de los datos son esenciales. Estos son:

- Latencia variable: El jitter introduce diferencias en el tiempo que tardan los paquetes en llegar a su destino. Se provocan retrasos irregulares o saltos en el flujo de datos. Lo cual afecta negativamente la calidad del audio o del video.
- Paquetes fuera de secuencia: Cuando llegan con diferentes retrasos, el receptor puede recibirlos con diferencia de orden, afectando la reproducción continua en el medio de transmisión. El VoIP, se traduce en voz entrecortada.

Pérdida de paquetes: Si el jitter excede un umbral crítico, los buffers de los dispositivos de red (enrutadores, switches) pueden descartar paquetes que lleguen tarde, lo que da lugar a pérdida de datos y más degradación de la señal. En redes de QoS, el jitter es un enemigo directo de la predictibilidad y estabilidad, por lo que debe ser gestionado de manera efectiva para asegurar una experiencia de usuario satisfactoria.

Para evaluar correctamente el jitter, se utilizan diversas mediciones que permiten cuantificar la variabilidad del tiempo de llegada de los paquetes.

- Media del jitter: Es el promedio de la variación en el tiempo de llegada de los paquetes. Este valor debe ser lo más bajo posible en redes de tiempo real. Nota: Si la media es baja (Menor a 20 ms), se considera que el jitter está bajo control. Un valor más alto significa que la red no es estable.
- Jitter máximo (Peak jitter): Mide la mayor variación observada entre los tiempos de llegada de los paquetes. Nota: Un valor máximo indica que en ciertos momentos el jitter se dispara, lo cual puede causar problemas esporádicos.
- Desviación estándar: Proporciona una visión de la dispersión de los tiempos de llegada con respecto a la media del jitter. Nota: Una desviación ata sugiere que el jitter es impredecible y puede ocasionar problemas en QoS.

Una vez se halla medido el jitter. Es necesario interpretar estos datos para asegurar que la red cumple con los estándares de calidad definidos.

Umbrales de QoS:

Para aplicaciones de voz, el jitter aceptable está generalmente por debajo de 30 ms. Cualquier valor superior puede degradar significativamente la calidad de la conversación.

En video y aplicaciones multimedia, un jitter aceptable está por debajo de 50 ms, ya que las aplicaciones de video suelen tener buffers más grandes que pueden absorber más variación.

Impacto en la experiencia del usuario: Si se observan valores altos en el jitter promedio o picos de jitter significativos, se deben ajustar las políticas de QoS para garantizar que el tráfico crítico (Como el de VoIP o video) reciba la prioridad necesaria.

Correlación con otros parámetros: El jitter generalmente va acompañado de otros problemas como son la latencia y pérdida de paquetes. Si el jitter es alto, es probable que otras mediciones también sean afectadas, por lo que es importante realizar un análisis holístico de la calidad de la red.

Monitoreo continuo: Las herramientas como Cisco IP SLA o Wireshark no solo permiten capturar los valores actuales de jitter, sino que también facilitan una monitorización en el tiempo. Esto es importante para detectar patrones o eventos que puedan estar afectando la calidad de la red en momentos específicos del día.

Conclusión: Se deben mantener los estándares de QoS frente al jitter. Para mantener los estándares de calidad de servicio, es fundamental monitorear continuamente el jitter y usar las mediciones “importantes” para identificar cuando los valores están fuera de rango. Si el jitter aumenta significativamente, se pueden implementar las siguientes estrategias:

- Priorización del tráfico: Utilizar técnicas de QoS, como la clasificación y la marcación del tráfico, para asegurar que las aplicaciones sensibles al jitter tengan la prioridad adecuada.

- Buffers de jitter: Configurar buffers adecuados en los dispositivos para suavizar las variaciones del jitter.

- Rediseño de la red**:** Si el jittter sigue siendo un problema crónico, es necesario optimizar rutas de red, eliminar cuellos de botella o mejorar la capacidad de la infraestructura de la red.

Interpretación de los resultados para mantener los estándares de calidad:

Una vez se haya medido el jitter, es necesario interpretar estos datos para asegurar que la red cumpla con los estándares de calidad definidos. Veamos algunos puntos importantes de los umbrales QoS:

a. Para aplicaciones de voz, el jitter aceptable está generalmente por debajo de 30 ms. Cualquier valor superior puede degradar significativamente la calidad de la conversación.
b. En video y aplicaciones multimedia, un jitter aceptable está por debajo de 50 ms, ya que las aplicaciones de video suelen tener buffers más grandes que pueden absorber más variación.
c. Impacto en la experiencia del usuario**:** Si observas valores altos en el jitter promedio o picos de jitter significativos, debes ajustar las políticas de QoS para garantizar que el tráfico crítico (como el de VoIP o video) reciba la prioridad necesaria.

Correlación con otros parámetros: El jitter está acompañado con latencia **y** pérdida de paquetes. Si el jitter es alto, es probable que otras mediciones se vean afectadas. Por lo tanto, es importante realizar un análisis holístico de la calidad de la red.

Monitoreo continuo: Las herramientas como Cisco IP SLA **o** Wireshark no solo permiten capturar los valores actuales del jitter, sino que también facilitan una monitorización en el tiempo. Esto es importante para detectar patrones o eventos que puedan estar afectando la calidad de la red en momentos específicos del día.

Mediciones en un enlace satelital:

Es necesario establecer un enlace directo desde un satélite hacia una estación terrena para establecer envío de información. La estación está conformada por equipos que están interconectados entre si, con una antena (Platón de 11 m. de diámetro). Existen 2 vías de comunicación:

- En banda base.
- Tx/Rx de radiación hacia el satélite.



Fig. 26 Configuración de un sistema satelital

La antena de apertura utilizada debe cumplir con alta directividad hacia la posición del satélite. En este caso se utilizará la denominada Reflector/subreflector (Case-grain). En el patrón de radiación deben aparecer lóbulos laterales con niveles bajos, de modo que sea minimizada cualquier posible interferencia con otros sistemas satelitales. El patrón mencionado debe cumplir con los requerimientos establecidos por las agencias regulatorias.

La ganancia y eficiencia de la antena deben ser altas en frecuencias de subida y bajada. Esto debe tenerse en cuenta debido a que las señales viajan a distancias del orden de los kilómetros.

Ganancia de antena: determina la potencia de salida del transmisor, utilizando una frecuencia up-link.

Sensibilidad: Recepción de señales, utilizando una frecuencia dwn-link.

En la figura 27 se aprecia el diagrama de bloques de una estación terrena. Está Conformado por: Sistema radiante, transceptor RF, modem, control de antena y monitoreo.

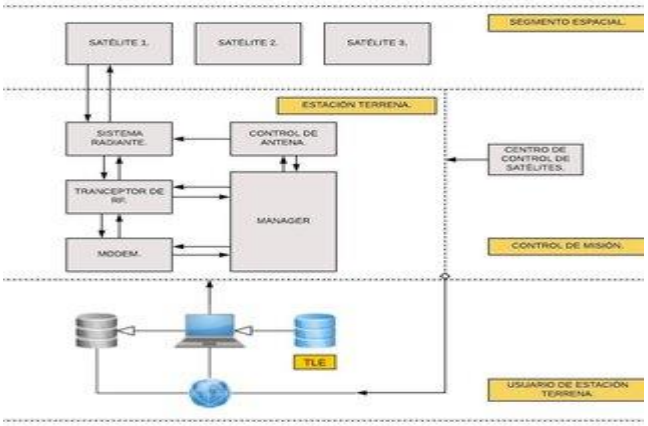


Fig. 27 Estructura de una estación terrena

La antena de apertura utilizada debe cumplir con alta directividad hacia la posición del satélite. En este caso se utilizará sistema reflector/subreflector. En el patrón de radiación deben aparecer lóbulos laterales con niveles bajos, de modo que sea minimizada cualquier posible interferencia con otros sistemas satelitales. El patrón de radiación mencionado, debe cumplir con los requerimientos establecidos por las agencias regulatorias. Fig. 28.

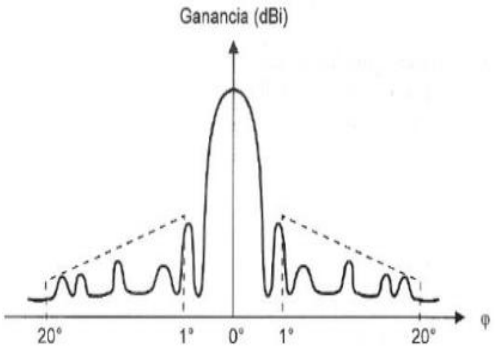


Fig. 28 Patrón de radiación. Limitación de los lóbulos laterales

Los parámetros: ganancia/eficiencia de antena deben ser altos en frecuencias de subida y bajada. Esto debe tenerse en cuenta debido a que las señales viajan a distancias del orden de los kilómetros. Fig. 29

- Ganancia de antena: Determina la potencia de salida del transmisor, utilizando una frecuencia up-link.
- Sensibilidad: Recepción de señales, utilizando una frecuencia down-link.



Fig. 29 Estación terrena (up-link/down-link)

Otros factores que afectan la eficiencia total de la antena son:

- Desbordamiento del sub-reflector.

- Gradiente de iluminación no uniforme.

- Obstrucción causada al reflector, debida al alimentador y su soporte o por el sub-reflector.

- Irregularidades de la superficie del reflector y polarización cruzada por acoplamiento a la polarización ortogonal.

Debe asegurarse aislamiento entre señales con polarizaciones ortogonales (en la recepción tanto en las antenas de los satélites como en las antenas de las estaciones terrenas, se podrán separar señales con polarizaciones ortogonales. Este método denominado “aislamiento de los cuatro puntos” garantiza un correcto funcionamiento cuando se utilizan otras frecuencias.

El Subsistema de Radiofrecuencia está Conformado por:

a. Transmisor: Compuesto por el amplificador de potencia y combinador de canalización.

b. Receptor: Compuesto por el amplificador de bajo ruido y el divisor de canalización.

c. Duplexer: Separa el sistema de transmisión del sistema receptor.

La señal a transmitir debe ser amplificada antes de ser entregada a la antena. Existen 3 tipos de amplificadores: SSPA o TWT.

La señal recibida utiliza un amplificador de bajo ruido LNA. La suma de las temperaturas de ruido (Antena/LNA), determinan la temperatura total de ruido del sistema de recepción.

Conociendo la temperatura de ruido T y la ganancia G de antena, se puede obtener el valor del cociente G/T. Es el parámetro utilizado comúnmente para definir las cualidades de recepción de una estación terrena. Esta relación se conoce como el factor de calidad o figura de mérito. Se representa como dB/K.

Mediciones en un enlace satelital:

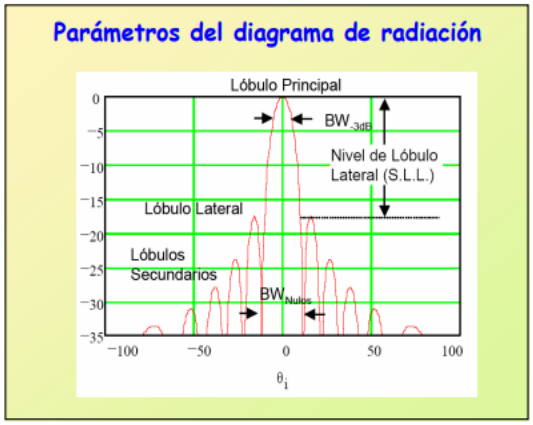


Fig. 30 Diagrama de radiación

Medición de la figura de mérito en recepción (G/T):

Esta prueba se realiza para medir la Ganancia recibida y la temperatura de antena en una estación terrena.

Para aplicar el método directo se utiliza un AE. Inicialmente se utiliza la señal piloto o una portadora pura. Se sigue un plan de pruebas que indica cual señal se usa dependiendo del G/T tentativo de la antena que está siendo probada. Se aplican varios sets de medidas para asegurar la veracidad de los resultados.

Procedimiento:

Se requiere un AE. Procedimiento:

a. Requerir a través del IOC que el asistente de la estación terrena (CSM), transmita una portadora sin modular a la frecuencia y polarización especificada en el plan de pruebas. Debe tener la suficiente potencia de modo que provoque una potencia de baja del satélite un valor predeterminado. Un valor típico PIRE down-link = 15 dBw. Lo que se busca es calcular C/No.
b. Realizar un “peak” de antena y se adquiere la señal de prueba sobre el AE. Se realizan movimientos AZ y ELE hasta encontrar el nivel máximo C. fig. 30

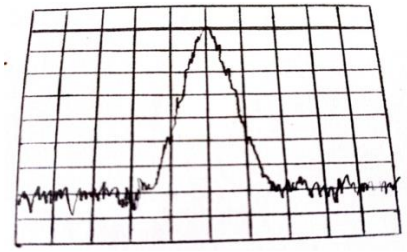


Fig. 31 Señal de prueba en AE

c. Ajustar resolución del ancho de banda del AE a 1 KHZ y se ajustan los atenuadores de paso al pico de la señal de prueba a una referencia conveniente. Se ajustan los filtros de video del

AE de modo que no haya desacierto en la medición del nivel de ruido. Se graban los sets de los atenuadores de paso.

d. Mover la antena en AZ a 5° aproximadamente, suficientes para asegurar que no se está recibiendo la señal. En este momento no se detecta la portadora. Se registra No.

e. Ajustar el paso de los atenuadores sobre el AE para localizar el ruido del piso al nivel de referencia usado en el paso 3. Se graban los sets de los atenuadores. NOTA: Verificar, removiendo y reconectando el cable de entrada que el nivel de la pantalla del AE, registre por lo menos 20 dB por encima del ruido de piso según se aprecia en la fig. 32

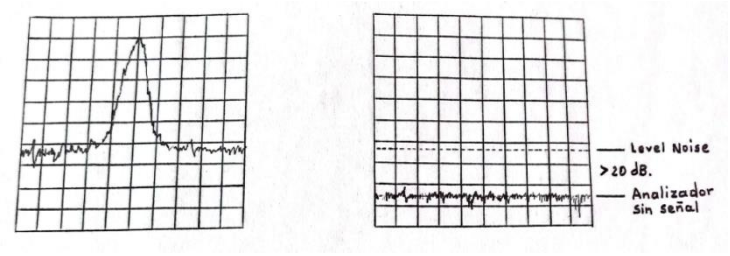


Fig. 32 Señal C/No sobre AE

Se encuentra C/No gráficamente:

C dB - No dB > 20 dB

1. Calcular la diferencia en el setting de atenuadores, grabados en los pasos 3 y 5. El resultado es la relación C+N/N de la señal.

También se puede calcular C/No a partir de C+N/N así:

Se adquiere la señal de prueba sobre el AE y se hace un “peak” de antena (localizarla en el centro de la pantalla). Fig. 32

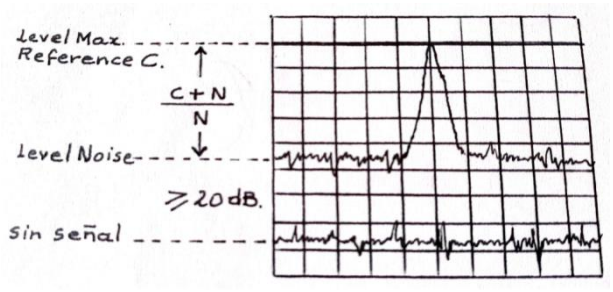


Fig. 33 Señal C+N/N sobre AE

2. Se mide C+N/N y calculamos C/N aplicando:

C/N = 10 log10[$(log^{-1}(\frac{C+N/N}{10})^{-1}]$ [Ec.29]

Este paso no es necesario si la relación C+N/N > 20dB, debido a que la corrección del resultado es menor que .1 dB

Una corrección adicional de -2.5 dB es necesaria para compensar el error que ocurre en el detector del AE cuando se está midiendo el valor RMS del nivel de ruido.

Puesto que C+N/N > 20 dB

C+N/N = C/N (Es una buena aproximación). [Ec.30]

La medición pues ser normalizada a la relación portadora a ruido según:

C/No = C/N – 2.5 dB + 10 log (NBW). [Ec.31]

NBW = 1.2 RBW. El valor RBW se fija en el AE

El log de la forma tiende a amplificar menos los picos de ruido de la señal. La señal detectada es más pequeña que su verdadero valor RMS.

Esta corrección para el log de modo display, combinadas con las características del detector, arroja una corrección total de 2.5 dB, la cual puede ser sumada a cualquier ruido aleatorio medido en el log de modo display.

NBW: Ruido de ancho de banda del AE en HZ. Debe ser determinado por la información del fabricante o por medición. Típicamente es 1.2 veces la resolución del ancho de banda.

Algunos AE tienen la opción de medir directamente, con las correcciones RMS y de ancho de banda incorporadas en la lectura del instrumento. Aplican los AE: HP856B o Tektronix 2754.

El valor aproximado es 1 dB/Hz.

Medición práctica G/T en una antena satelital (Platón 11 m de diámetro):

Se puede leer **No** directamente en la pantalla del AE.

a. Realizar un "peak" de antena.

b. Buscar el nivel C, leyendo el nivel de referencia máximo. Fig. 34

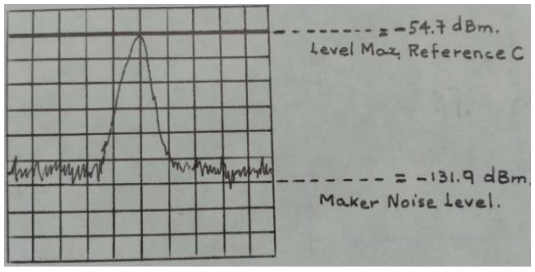


Fig. 34 Medición C/No

C/No = 77.2 dB

c. El MKR del AE, entrega una medición directa de No: Densidad de potencia de ruido en un ancho de banda de 1 khz.

d. Calcular: C/No = CdB – No dB

Cálculo G/T polarización LHCP utilizando LHCP usando la fórmula:

G/T = C/No – Kte. de Boltzman – EIRP sat. + Path loss + AC aspecto de corrección estimado

[Ec.32]

G/T (dB/°K) = 77.2 dB-Hz – 228.6 $\frac{dB/k}{Hz}$ – 15 dBw + 196.3 dB + 1.1. dB

G/T (dB/°K) = 31/°K

Tabla 8 Resultados G/T polarización LHCP:

Por medición de C/No utilizando un AE:

Parámetro	**Potencia dB**	**Observación**
EIRP bajada.	-15 dBw	Dado por CSM
K Boltzman.	-228.6 dB	Kte.
Path loss.	196.3 dB	Dado por CSM
Aspecto de corrección.	1.1 dB	Estimado
C/No medido con AE	77.2 dB	Medido
G/T	31 dB/K	Calculado
C	-54.7 dBm	Leído en el AE
No	-131.9 dBm	Leído en el AE

Tabla 9 Mediciones de C/No utilizando un AE:

Parámetro	Potencia dB	Observación
EIRP bajada.	-15 dBw	Dado por CSM
K Boltzman.	-228.6 dB	Kte.
Path loss.	196.3 dB	Dado por CSM
Aspecto de corrección.	1.1 dB	Estimado
C/No medido con AE	77.7 dB	Medido
G/T	31.5 dB/K	Calculado
C	-52.9 dBm	Leído en el AE
No	-130.6 dBm	Leído en el AE

Medición de la Ganancia en Transmisión LHCP y calibración EIRP:

Consiste en determinar la Ganancia de transmisión utilizando la antena bajo prueba y calibrar el EIRP de la estación terrena asociada.

Procedimiento**:** Instrumentos de medición: AE, medidor de potencia de RF con sensor, acoplador direccional y un generador de FI.

- IOC requiere que la estación terrena bajo prueba transmita una portadora pura a un nivel de potencia reducido en polarización LHCP a la frecuencia de prueba designada en el plan de pruebas. Aumentar lentamente la potencia de transmisión bajo la dirección del IOC, hasta cuando la estación CSM/Reference, reporte un EIRP

downlink del satélite de 18 dBw. Se mide y se graba el nivel de RF en el feed flange (puerto alimentador) de la antena y se reporta este nivel al IOC/TOCC. Se graba también el nivel de RF al punto de sistema monitor de EIRP.

- Medir en la estación terrena bajo prueba en el AE y grabar el nivel de potencia recibido de la portadora de prueba.

El IOC requiere que la estación CSM/REFERENCE radie una portadora de prueba sin modular, a la misma frecuencia y polarización de prueba y a un EIRP del mismo down link del satélite, como se hizo en el paso 1.

La estación CSM/REFERENCE reportará el EIRP, transmitido verbalmente al IOC. El IOC/TOCC, suplirá este nivel de potencia a la estación terrena bajo prueba. Asi mismo la diferencia en las pérdidas en el trayecto uplink y la diferencia en la ganancia de antena receptora del satélite*****. La estación terrena bajo prueba computará su ganancia de antena en transmisión de acuerdo con la siguiente fórmula:

G/T LHCP = EIRP csm/ref + Uplink path loss + AC csm/ref – Pot medida

- Uplink est. terrena – AC estación terrena [Ec.33]

G/T LHCP = + EIRP csm/ref portadora dBw

+ Uplink path loss de portadora CSM/referencia dB

+ AC CSM/REF portadora dB

– Pot medida en el flange de antena dBw

- Uplink est terrena pérdidas de trayecto de estación terrena (Bajo prueba)

– AC estación terrena bajo prueba.

* Los valores path loss y AC son suministrados en el plan de pruebas.

Pasos a seguir:

- Colocar un generador de FI (70 Mhz).
- Sintonizar el equipo Up converter satelital a 6.337 (Banda C).
- La señal que emite la estación terrena es monitorea en CSM, en un AE a la salida del LNA del puerto RHCP, si enviamos portadora por LHCP o viceversa.
- CSM determina el nivel de la portadora terrena de acuerdo con el plan de pruebas.
- Puesto que remotamente están monitoreando la señal de la estación terrena:

a**.** El sitio remoto, ordenan subir o bajar potencia de la estación terrena hasta lograr 15 dBw.

b. Si no se logra este nivel por falta de potencia de la estación terrena, (puesto que CSM puede llevar a saturación al transpondedor con estos 15 dBw), se debe alcanzar un valor en el medidor de potencia (que está ubicado en el puerto del alimentador) de modo que no se sature al HPA. Se comunica esta lectura al CSM.

c. Cuando al aumentar la potencia en el HPA no hay aumento de potencia en el alimentador, se concluye que se ha llegado al límite. Cuando llegamos a ese punto o al punto que provoque un EIRP de bajada del satélite de 15 dBw, se informa al CSM el valor de la potencia leída en el FFP.

Durante las pruebas puede definirse la potencia de la estación terrena (Bajo prueba) para el patrón de transmisión. Lo mismo que la potencia de CSM para el patrón de recepción, como un valor específico que provoque un EIRP downlink de 15 dBw. Se suspende la portadora y enseguida CSM coloca una portadora sin modular de la misma frecuencia y polarización con potencia suficiente

para lograr el mismo EIRP del satelite, lograda en el paso anterior (o sea, la prefijada o la máxima alcanzada como se mencionó en el principio sin que el SSPA sea llevado a saturación).

- CSM comunica a la estación bajo prueba, cual es el EIRP de la estación terrena. Será el mismo que colocó la estación bajo prueba y con el cual se calcula Gtx.

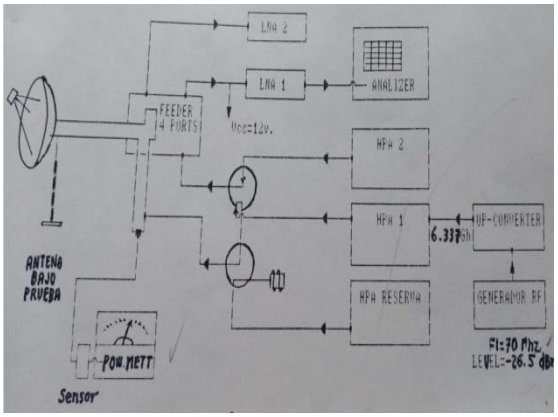


Fig. 35 Montaje para medición Tx/Rx de estación terrena

Tabla 10: Resultados Ganancia TX - Polarización LHCP

Antena satelital (Platón- diámetro 11 m)		
Parámetro	**Potencia dB**	**Observación**
EIRP CSM	69.65 dBw	Dado por CSM
UP link CSM	200.4 dB	Suministrado
AC CSM	2 dB	Suministrado
Potencia medida Estación terrena	- 13.9 dB	Medido
Up link Estación terrena	-200 dB	Suministrado
Aspecto de corrección Estación terrena	-1.2 dB	Suministrado
Ganancia tx	56.595 dB	Calculado

Tabla 11. Resultados Ganancia TX – Polarización RHCP

Antena satelital (Platón diámetro 11 m)

Antena satelital (Platón- diámetro 11 m)		
Parámetro	**Potencia dB**	**Observación**
EIRP CSM	70.53 dBw	Dado por CSM
UP link CSM	200.4 dB	Suministrado
AC CSM	2 dB	Suministrado
Potencia medida Estación terrena	- 15.2 dB	Medido
Up link Estación terrena	-200 dB	Suministrado
Aspecto de corrección Estación terrena	-1.2 dB	Suministrado
Ganancia Tx	56.53 dB	Calculado

Pruebas de transmisión de canales de Televisión:

Un sistema de televisión a color es un conjunto de tecnologías y estándares diseñados para transmitir imágenes en movimiento con información de color, brillo y sonido. Este sistema utiliza señales de radiofrecuencia (RF) para la transmisión y se compone de diversos elementos como cámaras, codificadores, transmisores, receptores y televisores.

En esencia, el sistema captura imágenes, las codifica en un formato adecuado (por ejemplo, NTSC, PAL, SECAM), las transmite a través de RF, y luego las decodifica en el televisor del espectador para reproducir imágenes y sonidos con fidelidad.

Descripción del procedimiento: Las mediciones y estudios de interferencias corresponden a mediciones de intensidad de campo eléctrico realizadas en los sitios a cubrir por el patrón de radiación de cada estación de transmisión. El objetivo de estas mediciones es determinar si los sitios que se pretenden cubrir con la señal irradiada por las antenas de la estación de transmisión, se encuentran libres al igual que las frecuencias asignadas a cada canal de televisión.

A su vez, certificar que las señales portadoras de video y audio se encuentren en los niveles apropiados de acuerdo con las recomendaciones para Radio comunicaciones ITU.

Se requiere un estudio previo a las mediciones en el cual se considere la potencia irradiada por la estación y la topografía del terreno con el cual se pueda determinar la atenuación por espacio libre. Adicionalmente, conocer la forma teórica de la intensidad de campo eléctrico que debería obtenerse en cada punto de medición. Estos cálculos se basan en las recomendaciones ITU-R 370-7 curvas de propagación en VHF Y UHF para el rango de frecuencias de 30 MHZ-1000 MHZ

Componentes básicos del sistema de televisión:

1. Fuente de video**:** Genera la señal de video (imágenes).
2. Codificación de color**:** Combina información: Crominancia y luminancia.

Crominancia: Transporta información de color usando la modulación QAM con una sub-portadora de 3.579545 MHz**.**

Luminancia: Determina el brillo (Se transmite en blanco y negro).

- Modulación**:** Convierte la señal de video y audio en una señal RF para transmisión.
- Transmisión: Se realiza a través de antenas terrestres, cable o satélite.
- Recepción**:** Los televisores decodifican la señal para reproducirla.

Estándares principales:

NTSC: Utilizado en América del Norte y Japón.

PAL: Común en Europa y Asia.

SECAM: Utilizado en Francia y algunos países europeos.

Mediciones básicas de señales de RF en sistemas de televisión:

Para asegurar la calidad de transmisión y recepción, se realizan varias mediciones fundamentales de RF. Son las siguientes:

1. Nivel de potencia de la señal RF**:** Determina la intensidad de la señal transmitida o recibida.

- Verificar si la potencia transmitida o recibida está dentro de los niveles aceptables.
- Instrumento utilizado: AE para medir nivel de RF.

2. Relación señal/ruido (SNR)**:** Indica calidad de la señal respecto al ruido.

- Evalúa la calidad de la señal en comparación con el ruido presente.
- Instrumento: Analizador de espectro o equipo de medición de señal.

3**.** Ancho de banda de la señal**:** La señal debe cumplir con especificaciones.

Se Confirma que la señal se ajuste al ancho de banda asignado (por ejemplo, 6 MHz para NTSC).

- Frecuencia portadora: Verifica que las señales se emitan en las bandas autorizadas.

- Verifica que la señal esté siendo transmitida en la frecuencia correcta.

- Instrumento: Generador de frecuencia y AE.

Sincronización de la señal:

- Controla señales de sincronización horizontal y vertical.
- Instrumento: Osciloscopio con funciones de sincronización.
- Distorsión de modulación**:** Asegura que la señal modulada no tenga interferencias o desajustes que degraden la calidad del video o audio.

Instrumentos de Medición:

- AE**:** Muestra señales en el dominio de frecuencia y detecta interferencias.
- Medidor de campo: Evalúa la calidad de recepción en ubicaciones específicas.
- Osciloscopio: Monitorea modulaciones y comportamientos en el dominio del tiempo.

- Analizador de señal de TV**:** Mide parámetros BER y relación Portadora/ruido.

Procedimientos y Metodología:

- Identificar las frecuencias y canales de interés.

- Verificar las condiciones ambientales (temperatura, humedad) que podrían afectar las mediciones.

Realizar mediciones:

- Mediciones en transmisores: Validar la potencia de salida, el espectro emitido y la modulación.
- Mediciones en recepción: Evaluar la calidad de la señal en distintos puntos geográficos.

Bandas de frecuencias:

El sistema NTSC opera en bandas de frecuencia asignadas para transmisión terrestre:

- VHF: Canales de 2 a 13 (54 MHz a 216 MHz).
- UHF: Canales de 14 a 83 (470 MHz a 890 MHz puede variar según el país.
- Cada canal tiene un ancho de banda de 6 MHz**,** que incluye componentes de video, audio y protección contra interferencias.

Requisitos para medición:

- Ubicación del receptor o antena: Las mediciones deben reflejar las condiciones reales del usuario final.

- Fuente emisora: Asegura que las mediciones cubran tanto el área de cobertura como los posibles puntos de sombra.

- Condiciones ambientales**:** Ten en cuenta factores como clima, obstrucciones y entorno electromagnético.

Protocolos de medición:

- Calibración previa**:** Los equipos deben estar calibrados para garantizar resultados precisos.
- Puntos de medición definidos: Realiza mediciones en puntos representativos, como zonas de alta y baja cobertura.
- Registro de datos: Documentación de valores medidos, incluyendo ubicación, fecha y hora.

Interpretación y análisis:

- Comparar con especificaciones: Evalúa si las mediciones cumplen con los requisitos técnicos y regulatorios.

- Identificar problemas: Detecta áreas con baja cobertura, interferencias o desajustes en parámetros técnicos.

- Optimización: Utiliza los datos para ajustar transmisores, antenas o mejorar la configuración de la red.

Señal de Televisión. Portadoras: Video y audio:

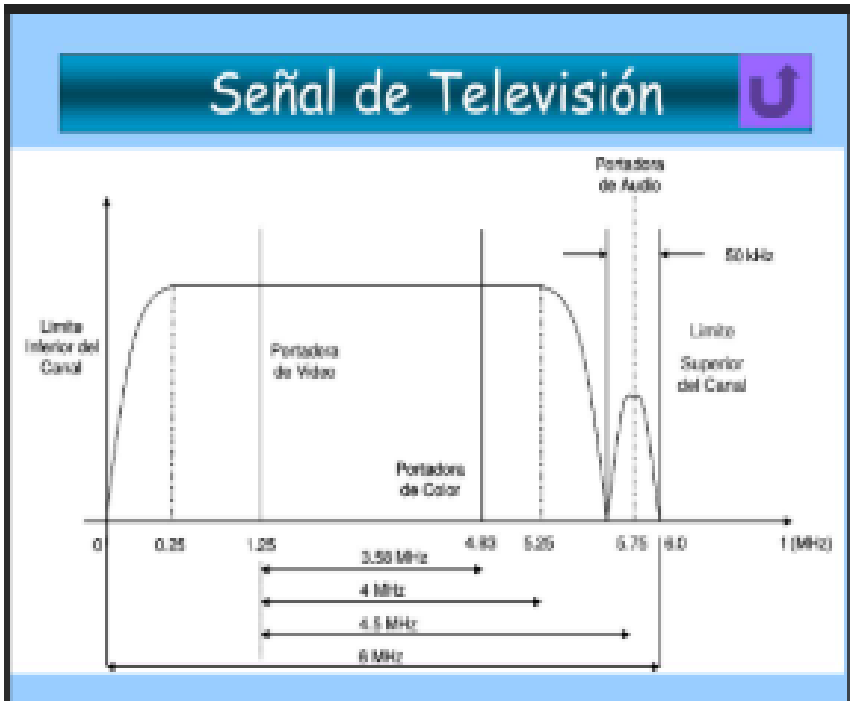


Fig. 36 Señal de televisión (Portadoras Video/audio)

Descripción del procedimiento:

Las mediciones y estudios de interferencias corresponden a mediciones de intensidad de campo eléctrico, realizadas en los sitios a cubrir por el patrón de radiación de cada estación de transmisión. El objetivo de estas mediciones es determinar si los sitios que se pretenden cubrir con la señal irradiada por las antenas de la estación de transmisión, aplican para las frecuencias asignadas a cada canal. Deben encontrarse libres y a su vez permitir que las señales portadoras de video y audio se encuentren en los niveles apropiados de acuerdo con las recomendaciones para Radio comunicaciones ITU.

Se requiere un estudio previo a las mediciones. Debe considerarse la potencia irradiada por la estación y la topografía del terreno con el cual se pueda determinar la atenuación por espacio libre y de esta forma conocer teóricamente la intensidad de campo eléctrico que debería obtenerse en cada punto de medición. Estos cálculos se basan en las recomendaciones ITU-R 370-7 curvas de propagación en VHF Y UHF para el rango de frecuencias de 30 MHZ – 1000 MHZ.

De acuerdo con las recomendaciones ITU-R BT 417-4, los valores mínimos de intensidad de campo eléctrico (dB$\mathcal{M}$V/m) deseados como protección de interferencias se indican en la tabla 12:

Tabla 12 Los valores presentados para la banda IV y V

deben ser incrementados en 2 dB para sistema K

Banda		III	IV	V
dB$\mathcal{M}$Vm	+ 48	+ 55	+ 65 (I)	+70 (I)

Estos valores se refieren a mediciones realizadas a una altura de 10 m. sobre el nivel de la tierra.

En ausencia de interferencias de otras transmisiones de televisión, la mínima intensidad de campo en la antena receptora que permita una calidad de imagen satisfactoria se indica en la tabla 13.

Tabla 13 Los valores presentados para la banda IV y V

deben ser incrementados en 2 dB para sistema K

Banda		III	IV	V
dB$\mathcal{M}$Vm	47	+ 53	+ 62 (I)	+67 (I)

Estos valores se refieren a mediciones realizadas a una altura de 10 m. sobre el nivel de la tierra. De acuerdo con esto y a la recomendación ITU-R BT 804 las limitaciones de ruido corresponden en un sistema B.G a tabla 14:

Tabla 14 Limitaciones de ruido en un sistema B, G

	Características	B,G	B,G
	Rango	VHF	UHF
1	Ruido /Sensibilidad limitada dBm	-61	-58

Los valores para la ganancia de la antena y pérdidas en el cable se indican en la tabla 15.

Tabla 15 Valores para ganancia de antena y pérdidas en el cable

	Banda I	Banda III	Banda IV	Banda V
Minimo SG dB$\mathcal{M}$Vm	47	53	62 (I)	67 (I)
Ganancia antena (dB)	3.5	7.5	10	12
Pérdida en cable (dB)	1	1.5	3	4.5
Factor de conversión del dipolo (2) (dB)	2	13	20.5	25

1. Los valores presentados deben ser incrementados en 2 dB para sistema K.
2. 20 log 2λ/λ

La designación de bandas de frecuencia de broadcast I, III, IV y V corresponden a tabla 16:

Tabla 16 Designación de bandas de frecuencia

Banda I	54-88 Mhz	Canales	2-6
Banda III	174-216 Mhz	Canales	7-13
Banda IV	470-632 Mhz	Canales	14-40
Banda V	632-806 Mhz	Canales	41-69

Durante la toma de muestras se tienen presentes los siguientes factores:

Factor K de ganancia o atenuación de las antenas.

Factor A de atenuación y/o ganancia dadas en el cable, transformadores de impedancia, acopladores y pérdidas por retorno causadas por las antenas.

Estos factores son conocidos y se incorporan en la memoria del AE al igual que las tablas de factores de las antenas, las lecturas dadas por este AE son directas y corresponden a dBs relativos a 1 microvoltio/m **dB$\mathcal{M}$Vm** (Recomendación ITU-R BT 417-4). El cálculo interno que realiza el AE para entregar una lectura directa, es el siguiente:

$$P\ dB\mathcal{M}V/m = P\ dBm + 107 - A + K \qquad [Ec.34]$$

P dBm: Medición del AE en dBm

A: Ganancia o atenuación externa

(A es negativo para atenuación y + para ganancia).

K: Factor de antena

Los parámetros del AE para medición en cada canal se configuran de la siguiente manera:

Frecuencia central: Frecuencia asignada a la portadora visual del canal correspondiente.

Span/división: .5 o 1 Mhz.

Resolución BW: 300 Khz

Trigger: Free Run.

Modo display: Pico.

En tabla 17 se aprecia barrido de frecuencias en diferentes bandas.

Tabla 17 Barrido de frecuencias

Banda I	54-88 Mhz	Canales	2-6
Banda III	174-216 Mhz	Canales	7-13
Banda IV	470-632 Mhz	Canales	14-40
Banda V	632-806 Mhz	Canales	41-69

Dadas las características y rango de cubrimiento de las antenas a emplear, para mediciones en las tablas I y III se utiliza la antena bicónica la cual permite mediciones de campo eléctrico en un rango de frecuencias de 20 MHZ– 300 MHZ.

Para las mediciones en la banda IV se utiliza la antena log periódica EM-6950, la cual permite mediciones de campo eléctrico en un rango de 200 MHZ – 1000 MHZ, el diseño de la antena permite mediciones de campo eléctrico vertical y horizontal.

Se requiere que el sitio donde se realicen las pruebas se encuentren lo menos afectados por líneas de tensión eléctrica (voltaje) o líneas telefónicas. Al igual se requiere que ese sitio se encuentre en línea de vista directa con la estación transmisora.

Las mediciones se realizan instalando una antena sobre un mástil telescópico y elevándola a una altura de 10 m. (Recomendación ITU-R BT 417-4), además el mástil permite orientar las antenas en un rango de 360° para barrido en todas las direcciones.

La conexión de las antenas con el AE se realiza a través de un cable RG-214/U (Impedancia 50 Ω patronado con factor de pérdida conocido y adicionado en la memoria del AE-

La programación del AE y la captura de datos se realiza a través de un software propio del AE.

Entrega resultados en base de datos y en archivo gráficos.

Parámetros utilizados para análisis:

Corresponden a los datos de acuerdo con las siguientes recomendaciones ITU-R.

ITU-R BT 417-4: Niveles mínimos de campo eléctrico para protección de señales durante la planeación de servicios de televisión,

ITU.R BT.804 Características esenciales de los receptores de televisión durante la planeación de sistemas de televisión PAL/SECAM/NTSC.

ITU-R P.370-7 Curvas de propagación en VHF y UHF para los rangos de frecuencias de 300 MHZ a 1000 MHZ

ITU-RBT 655-4 Relación de protección de radio frecuencia para sistemas de televisión.

Resultados esperados:

La recomendación ITU-R P 370-7 permite realizar una predicción de los niveles de intensidad de campo eléctrico en cada punto, teniendo en cuenta las características de transmisión como son la potencia radiada efectiva, la altura de las antenas de transmisión, la orientación de las mismas, la distancia a la cual se encuentra cada punto de la estación transmisora y la topografía del terreno.

Entrega de resultados:

El informe que debe ser entregado incluye un análisis de los datos obtenidos, junto con los datos medidos entregados como una base de datos y en forma gráfica. Se incluye la evaluación de las interferencias medidas determinando el tipo de interferencias y la posible dirección de origen y alternativas en frecuencias para aquellos sitios donde se encuentren interferencias considerables.

Medición de Cobertura:

La calidad del servicio de televisión está relacionada con la intensidad de campo eléctrico de la señal recibida, sensibilidad del receptor, figura de ruido, ganancia de la antena, pérdidas en la línea de transmisión y las tolerancias de las relaciones Señal/ruido.

La siguiente tabla indica las IC media requerida para diferentes grados de servicios en ausencia de señales interferentes de acuerdo con la FCC y la revisión de la TASO. Las IC medidas de la tabla se basan en medidas realizadas por una antena a 9 m. de altura por encima del suelo.

La ubicación de la antena de medición es muy importante puesto que los obstáculos tales como árboles o edificios pueden variar la medición a distancias cortas. Esta variación debe ser tomada en cuenta cuando se realizan las mediciones, al igual cuando se especifica la calidad del servicio.

Los resultados de las mediciones se pueden mostrar en mapas de cobertura no como se muestra en la tabla 18.

Tabla 18 Normas de Radiodifusión Televisiva Técnicos FCC

Grado del servicio	Canal 2-6 $\mathcal{M}$V/m	Canal 7-13	Canal 14-83
Ciudad principal	5000	7.000	10.000
Grado A	2500	3.500	5.000
Grado B	225	650	1.600
Grado del servicio	Canal 2-6 $\mathcal{M}$V/m	Canal 7-13	Canal 14-83
Ciudad principal	5000	7.000	10.000
Grado A	2500	3.500	5.000
Grado B	225	650	1.600

Tabla 19 Basada en datos TASO

Basado en datos TASO	Canal 2-6 $\mathcal{M}$V/m	Canal 7-13	Canal 14-83
Primario	250	1.400	7500
Secundario	50	200	630
Fringe	20	55	180

Tabla 20 Frecuencias de los canales de televisión:

Canal	bw 1	bw 2	f. video	f. audio	Canal	bw 3	bw 4	f. video	f. audio
2	54	60	55.25	59.75	7	174	180	175.25	179.75
3	60	66	61.25	69.75	8	180	186	181.25	185.25
4	66	72	67.25	71.75	9	186	192	187.25	191.75
					10	192	198	193.25	197.75
5	76	82	77.25	81.75	11	198	204	199.25	203.75
6	82	88	83.25	87.75	12	204	210	199.25	203.75
					13	210	216	205.25	209.75
14	470	476	471.25	475.25	49	680	686	681.25	685.75
15	476	482	477.25	481.75	50	686	692	687.25	691.75
16	482	488	483.25	487.75	51	692	698	693.25	697.75
17	488	494	489.25	493.75	52	698	704	699.25	703.75
18	494	500	495.75	499.75	53	704	710	705.25	709.75
19	500	506	501.25	505.75	54	710	716	711.25	715.75
20	506	512	507.25	511.75	55	716	722	717.25	721.75
21	512	518	513.25	517.25	56	722	728	723.25	727.75
22	518	524	519.25	523.75	57	728	734	729.25	733.75
23	524	530	525.25	529.75	58	734	740	735.25	739.75
24	530	536	531.25	535.75	59	740	746	741.25	745.75
25	536	542	537.25	541.75	60	746	752	747.25	751.75
26	542	548	543.25	547.75	61	752	758	753.25	757.75
27	548	554	549.25	553.75	62	758	764	759.25	763.75
28	554	560	555.25	559.75	63	764	770	765.25	769.75
29	560	566	561.25	565.75	64	770	776	771.25	775.75
30	566	572	567.25	571.75	65	776	782	777.25	781.75
31	572	578	573,25	577.75	66	782	788	783.25	787.75
32	578	584	579.25	583.75	67	788	794	789.25	793.75
33	584	590	585.25	589.75	68	794	800	795.25	799.75
34	590	596	591.25	595.75	69	800	806	801.25	805.75
35	596	602	597.25	601.75	70	806	812	807.25	811.75
36	602	608	603.25	607.75	71	812	818	813.25	817.75
37	608	614	609.25	613.75	72	818	824	819.25	823.75
38	614	620	615.25	619.75	73	824	830	825.25	829.75
39	620	626	621.25	625.75	74	830	836	831.25	835.75
40	626	632	627.25	631.75	75	836	842	837.25	841.75
41	632	638	633.25	637.75	76	842	848	843.25	847.75
42	638	644	639.25	643.75	77	848	854	849.25	853.75
43	644	650	645.25	649.75	78	854	860	855.25	859.75
44	650	656	651.25	655.75	79	860	866	861.25	865.75
45	656	662	657.25	661.75	80	866	872	867.25	871.75
46	662	668	663.25	667.75	81	872	878	873.25	877.75
47	668	674	669.25	673.75	82	878	884	879.25	883.75
48	674	680	675.25	679.75	83	884	890	885.25	889.75

Tabla 20 Canales de televisión

Notas:

Frecuencias del canal 14 al 20: Utilizados para servicios no televisivos.
Frecuencias del canal 70 al 83: Utilizados para telefonía celular

Medición de canales de televisión: Deben adecuarse a los requerimientos y parámetros de calidad de los servicios. A modo de ejercicio se utilizarán 2 equipos: AE y el medidor de campo. Se realizarán mediciones sobre canales de televisión analógicos y digitales. Así:

Se explicará la forma de interpretar las mediciones. Se analizará la importancia y significado del parámetro ancho de banda de resolución RBW, indicando la importancia en las medidas efectuadas. Finalmente se analizará la diferencia entre canales analógicos y digitales en los sistemas de radiodifusión terrena.

Se realizarán las mediciones de los niveles de señal. Estos permiten ajustar la forma correcta de la cabecera y se confirmará el nivel adecuado en las tomas de usuario.

RBW influye en la medida que se realiza de la señal RF recibida. Es decir, es el ancho de banda en el cual el instrumento de medición realiza la detección de la señal y por lo tanto no considera la energía de señal fuera de este ancho de banda. El AE es un receptor superheterodino de ancho de banda de frecuencia intermedia variable. En el instrumento se puede elegir el ancho de banda RBW (En la práctica no supera los 3 MHZ).

En señales analógicas con modulación AM, la energía está concentrada alrededor de la frecuencia portadora. Se obvia el ancho de banda de la medición puesto que la señal no supera los 300 KHZ.

RBW debe tenerse en cuenta para mediciones de televisión digital.

En este caso, el ancho de banda de resolución no se toma igual al ancho de banda real de la señal. Por ello, el valor de la potencia de la señal no se puede medir. directamente del valor leído en el instrumento de medición. Se puede calcular a partir del valor medido.

En el canal digital la energía está distribuida uniformemente. La potencia de la señal se puede expresar de la siguiente manera:

Ps = Pm + Pm x Bw/RBW [Ec.35]

Ps: Potencia real de la señal.

Pm: Potencia medida.

RBW: Ancho de banda de la medición (Resolución del ancho de banda).

Para medir el valor de Pm no es necesario escoger el punto de medida sobre la portadora de video del canal a medir. En el canal digital, la energía se distribuye de forma uniforme a lo largo del canal. Pm se puede medir a cualquier frecuencia dentro de dicho ancho de banda.

Medición práctica de un canal de televisión: En la figura 37 se muestra la medición del canal 52 (analógico), realizada con un AE.

Portadora de video: 719.25 MHZ

Potencia: -45.6 dBm

Portadora de audio: 724.75 MHZ

Potencia: -64.6 dBm.

Se observa como la mayor parte de la energía se concentra alrededor de estas portadoras.



Fig. 37 Medida canal de televisión analógico utilizando AE.

En la fig. 38 se aprecia la misma medición realizada con un medidor de campo.

En este caso se observa:

Portadora de video: 65,7 dBµV

Portadora de audio: 50.5 dBµV

Se aprecia correspondencia entre las potencias obtenidas en ambas mediciones.

Si transformamos el valor medido con el AE.

Uso de un medidor de campo: Se aprecia en la figura 37.

En este caso observamos la portadora de vídeo con un nivel de 65,7 dBµV, y la portadora de audio con un nivel de 50,5 dBµV. Es posible ver la correspondencia entre las potencias obtenidas en ambas medidas.

Transformando el valor medido con el AE (dBm) a valor medido con el medidor de campo (dBµV) se obtiene:

-45.6 dBm = 10 log (Pb/1mW) Pb = Vb2 /75 [Ec.36]

20 log (Vb/10-6) = 63,15 dBµV [Ec.37]

Conclusión: Las 2 mediciones son precisas.

Para apreciar las diferencias con un canal digital, realizaremos la medida en el canal 61, Ocupa un ancho de banda de 790 a 798 MHZ. Se utiliza un AE. Se aprecia el resultado en la fig. 38.

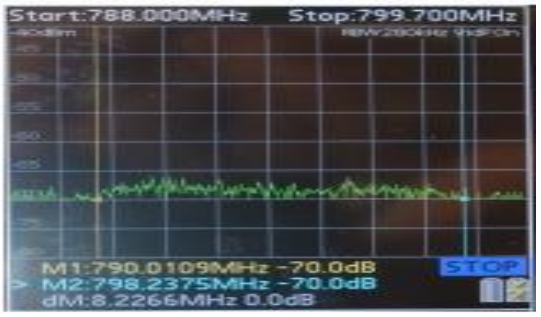


Figura 38 Medida de canal digital utilizando AE

Se observa que la energía se distribuye de forma casi uniforme en el ancho de banda del canal.

Para realizar la medida se opta por:

Ancho de banda de medida RBW = 280 Khz.

Se mide a frecuencia: 792.52 Mhz.

Potencia medida: -66 dBm.

Aplicando la formula anterior se obtiene:

Ps (dBm) = Pm (dBm)+10 log(1+Bw/RBW) = -51.29 dBm [Ec.38]

En la fig. 38 se realiza la medida con un medidor de campo utilizando:

RBW = 100 Khz.

Potencia medida = 54 dBµV = -54,6 dBm.

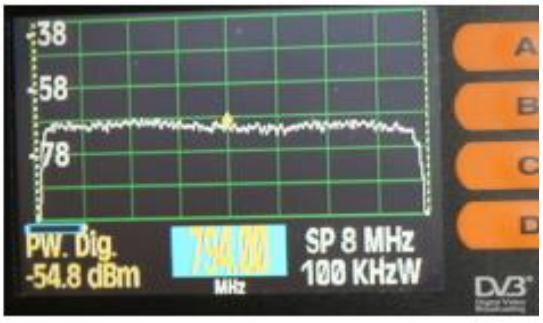


Figura 39 Medida canal digital utilizando medidor de campo

En la fig. 38 se muestra el nivel de señal recalculado según la resolución utilizada en el ancho de banda de medición. Se detecta un nivel de medida similar al obtenido con el AE

Mediciones de comunicaciones inalámbricas:

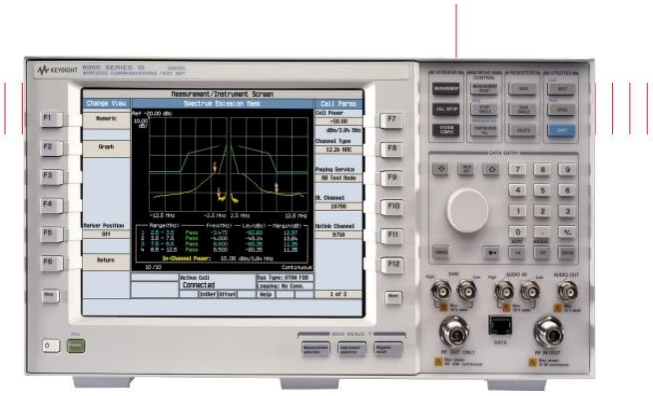


Fig. 40 Equipo de prueba Agilent 555c utilizado en mediciones de comunicaciones inalámbricas.

Las pruebas de rendimiento de las aplicaciones en un canal de RF adquieren importancia. Son aplicadas a las nuevas tecnologías inalámbricas centradas en los datos como HSDPA. La razón principal es optimizar las redes.

- Una red celular (Voz), está optimizada para la capacidad en términos de número de usuarios o llamadas. A cada usuario se le asigna un ancho de banda fijo.

Una red celular (Datos), está optimizada en el rendimiento general. Se desarrollan técnicas para aumentar el rendimiento instantáneo de los datos cuando las condiciones lo permitan.

HSDPA lo realiza utilizando paquetes cortos, cambiando el formato de modulación y las opciones de codificación en función de las características del canal.

MIMO (Entrada múltiple, salida múltiple): Es una tecnología que pretende aumentar el rendimiento instantáneo, mediante la transmisión de datos en forma de flujos espaciales paralelos donde las condiciones de propagación lo permitan. Esta tecnología hace que la aplicación sea un desarrollo continuo de funciones.

A medida que los operadores de redes celulares amplían su oferta de aplicaciones de datos y lanzan nuevos servicios con las tecnologías: GPRS, EDGE, W-CDMA y HSDPA, los requisitos en el MS son cada vez más exigentes.

Históricamente, las necesidades de pruebas para el software y el hardware de MS se han separado. Los desarrolladores de software utilizan soluciones de scripting y los que utilizan pruebas basadas en la capa RF.

Despliegue de la tecnología CDMA:

Tecnología de acceso múltiple por división de código. Es un método de comunicación digital, utilizado en sistemas de telecomunicaciones móviles.

Es una técnica de multiplexaje que permite que varios usuarios compartan el mismo espectro de frecuencia al mismo tiempo.

- Se diferencian sus señales mediante códigos únicos. O sea, asigna a cada usuario un código único para transmitir sus datos.
- Los datos de cada usuario se modulan con un código de secuencia falso-aleatoria que es matemáticamente ortogonal a los códigos de otros usuarios. Esto permite que las señales se distingan y se recuperen correctamente en el receptor, incluso si ocupan el mismo ancho de banda.

- Su propagación espectral es de espectro ensanchado “Spread spectrum”. Las señales de datos se expanden a través de un ancho de banda mucho mayor que el necesario para transmitir los datos. Esto proporciona:
- Resistencia a interferencias.
- Seguridad en la comunicación.
- Mayor capacidad en comparación con otros métodos.

Características principales:

a. Uso eficiente del espectro: CDMA puede soportar más usuarios en el mismo ancho de banda en comparación con FDMA o TDMA.

b. Reutilización de frecuencias**:** Las celdas pueden reutilizar el mismo espectro sin causar interferencias significativas.

c. Tolerancia al ruido e interferencia**:** Debido al proceso de ganancia y las técnicas de corrección de errores, CDMA es menos susceptible a interferencias externas.

d. Sincronización: Requiere una sincronización precisa entre el transmisor y el receptor para separar correctamente las señales de diferentes usuarios.

e. Seguridad: La señal dispersa dificulta la intercepción y decodificación por terceros.

Ventajas de CDMA:

- Mayor capacidad de usuarios.
- Mejor calidad de llamada y resistencia al desvanecimiento (Fading)

- Flexibilidad en la planificación de redes móviles.
- Mayor seguridad debido a la dificultad de interceptar señales dispersas.

Aplicación CDMA:

Redes móviles WCDMA: Versión de banda ancha utilizada en redes 3G, como UMTS: Sistema universal de Telecomunicaciones móviles.

- GPD (sistema global de posicionamiento): Los satélites GPS utilizan CDMA para enviar señales únicas a múltiples receptores en la tierra, permitiendo que estos distingan entre diferentes satélites y calculen posiciones precisas.
- Comunicaciones satelitales**:** Utilizado en sistemas satelitales para asignar múltiples usuarios al mismo canal de frecuencia. Es el caso de las redes iridium utilizadas para telefonía satelital.
- Redes inalámbricas privadas: Sistemas CDMA se implementan en comunicaciones seguras, tales como redes militares y gubernamentales, debido a su alta resistencia a interferencias y seguridad.
- Aplicaciones IoT (Internet de las cosas): Permite la conectividad de dispositivos IoT en entornos densos, optimizando el espectro.

Medición de parámetros en un sistema CDMA:

1. Definir los parámetros a medir.
2. Potencia de señal.
3. Relación SNR

4. BLER
5. Interferencia y distorsión de señal

Configurar el instrumento:

- Seleccionar la banda de frecuencia del sistema CDMA.
- Configurar el instrumento para trabajar con el estándar específico (IS-95, CDMA2000).

Medición en laboratorio:

- Conexión al transmisor: Conectar el analizador al transmisor. Puede ser una estación base CDMA o un emulador de red.
- Realizar análisis espectral: Usar un AE para verificar que la señal esté correctamente modulada.
- Asegurarse de que la dispersión espectral cumpla con los estándares.

Evaluar el BER y BLER:

- Introducir ruido controlado para simular condiciones en tiempo real
- Medir BER y BLER para evaluar la calidad de la transmisión.

Medición en campo:

Configuración del drive test:

- Montar un receptor en un vehículo equipado con herramientas TEMS.
- Configurar para registrar parámetros: Potencia de señal, BLER y cobertura.

Recolección de datos:

- Realizar un recorrido dentro del área de cobertura.
- Registrar zonas de baja calidad de señal o alta interferencia.

Procesar los datos con herramientas de análisis post-prueba para identificar problemas específicos: Interferencias o puntos de baja cobertura.

Caso práctico de medición:

Verificar el rendimiento de una estación base CDMA2000.

I. Configurar el AE para monitorear la señal RF.

II. Medir el ancho de banda ocupado y la potencia de transmisión.

III. Utilizar un analizador de protocolos para verificar la configuración de los códigos ortogonales asignados a cada usuario.

IV. Introducir interferencias controladas y medir cómo se afecta la tasa de error BER o BLER

Se utiliza este equipo de medición para pruebas de aplicación que son requeridas durante la fase de integración y diseño del sistema.

En un sistema de telefonía celular, las mediciones son esenciales para garantizar la calidad del servicio (QoS), optimizar la red y resolver problemas de rendimiento. Son las siguientes:

Medición de cobertura:

Intensidad de señal RSRP:

-Indica la potencia de la señal recibida en tecnología LTE o 5G.

- Unidades: dBm (Ejemplo, -70 dBm es una señal fuerte; -110 dBm es débil).

Calidad de señal RSRQ:

- Mide la calidad relativa de la señal considerando interferencias y ruido.

- Unidades: dB (valores más altos son mejores)

Medición de calidad:

SNR: Relación entre la potencia de la señal y el nivel de ruido. Es importante para

Determinar si la señal es utilizable.

SINR:

- Similar al SNR. Incluye interferencia de celdas cercanas.
- Valores altos (20 dB o más) indican buena calidad.

Mediciones de capacidad:

Rendimiento:

- Velocidad efectiva de transmisión de datos medida en Mbps.

- Diferentes para enlace ascendente (UL) y descendente (DL).

Latencia:

- Tiempo que tarda un paquete en viajar de un punto a otro (ms).
- Crítico para aplicaciones en tiempo real como VoIP.

Pérdida de paquetes: Mide la cantidad de datos que no llegan al destino.

Mediciones relacionadas con la conexión:

- Tasa de llamadas caídas (Drop Call Rate):

Porcentaje de llamadas que se terminan inesperadamente.

- Retardo en el establecimiento de llamadas (Call Setup Time):
- Tiempo necesario para conectar una llamada.
- Handover rate: Indicador de rendimiento.
- Porcentaje de transferencias exitosas de una celda a la otra.

Mediciones de interferencia:

- CINR (carrier to interference noise ratio):

- Similar a SINR, usado para tecnologías como GSM.

- Intermodulación:

- Verifica señales no deseadas generadas por componentes de red.

Mediciones específicas de tecnologías: *LTE/4G:*

CQI (Channel Quality Indicator):

- Indicador de la calidad del canal, reportado por los dispositivos.
- Utilización PRB: Porcentaje de bloques de recursos utilizados.

Mediciones específicas de tecnologías *5G:*

Medida de la conformación de haces: Analiza la calidad y potencia de los haces dirigidos al usuario.

- BLER (Block Error Rate):
- Tasa de bloques de datos con errores.

Herramientas para realizar las mediciones:

Drive Test Tools:

- Herramientas como TEMS Investigation, Nemo Outdoor o Rohde & Schwarz ROMES para pruebas en movimiento.
- Analizador de Protocolo:
- Verifica comunicaciones entre dispositivos y red.

Software de monitoreo de red:

Utiliza OSS (Operation Support Systems) de fabricantes como Ericsson o Huawei.

Medición de canales adyacentes:

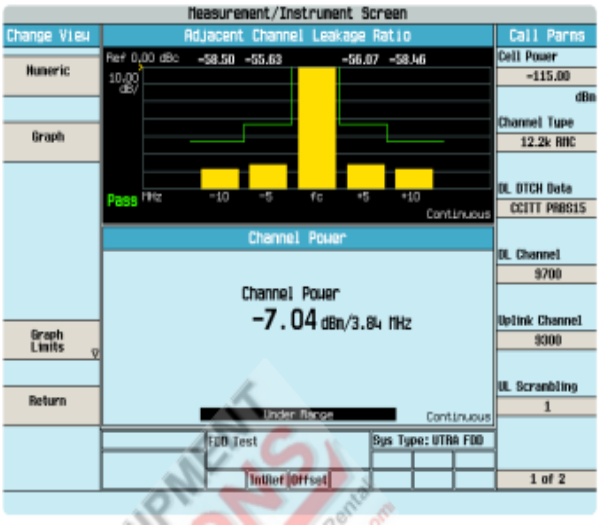


Fig. 41 Medición de canales adyacentes

Introducción: (ACLR)**:** Es una medida utilizada en telecomunicaciones para evaluar la cantidad de energía no deseada que se "filtra" o se dispersa desde el canal principal de transmisión hacia los canales adyacentes. Este parámetro es fundamental para garantizar que los sistemas de comunicación no interfieran con las transmisiones en canales vecinos.

$$\text{ACLR} = 10 \log_{10} \left[\frac{Potencia\ en\ el\ canal\ principal}{Potencia\ en\ el\ canal\ adyacente}\right] \text{ dB} \quad \text{[Ec.39]}$$

ACLR: Se define como la relación de la potencia promedio en el canal principal (donde ocurre la transmisión intencionada) frente a la potencia promedio medida en un canal adyacente.

Importancia:

- Control de interferencia: Un ACLR bajo indica que hay una mayor cantidad de energía filtrándose hacia los canales adyacentes, lo que puede causar interferencia en sistemas cercanos.

- Cumplimiento normativo: Regulaciones como las de la 3GPP para LTE/5G o las de la FCC imponen límites estrictos al ACLR para evitar interferencias entre operadores o sistemas.

- Calidad de la señal: Un buen ACLR garantiza que la transmisión permanezca limpia y eficiente, mejorando la calidad del servicio.

Factores que afectan a ACLR:

1. Diseño del transmisor: Transmisores de baja calidad pueden generar componentes (picos abruptos) en los canales adyacentes.
2. No linealidades: Amplificadores de potencia no lineales pueden distorsionar la señal, creando productos de intermodulación.
3. Filtro de transmisión: Un filtrado insuficiente puede dejar pasar componentes no deseados fuera del canal principal.
4. Ancho de banda de la señal: Señales con mayor ancho de banda (como LTE o 5G) son más propensas a extenderse a los canales adyacentes.

Medición ACLR*:*

Equipo utilizado:

- AE o analizador de señales.

- Generador de señal para calibración, si es necesario.

1. Procedimiento:

    a. Se mide la potencia promedio dentro del canal principal.

    b. Se mide la potencia promedio dentro de los canales adyacentes.

    c. Se calcula la relación en decibelios (dB) entre ambas potencias.

2. Especificaciones: Las normas como 3GPP suelen definir el ancho de banda del canal principal y los canales adyacentes, así como los límites de ACLR aceptables.

Un ACLR típico puede tener valores entre 45 dB y 65 dB en sistemas bien diseñados, dependiendo de la tecnología y los requisitos regulatorios.

Medición de la relación de error de bloques BLER:

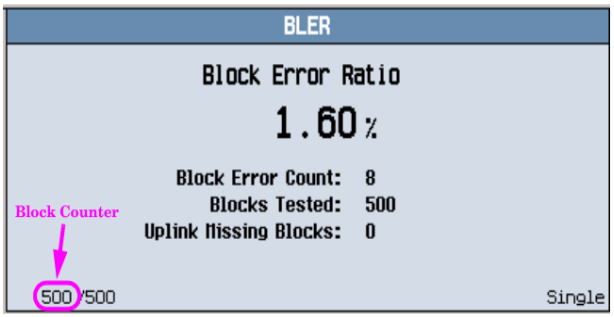


Fig. 42 Medición de relación de error bloque BLER

Relación de error de bloques BLER: Es una medición utilizada en redes móviles (LTE, 5G) para evaluar la calidad de una transmisión de datos. Mide la porción de bloques de datos

transmitidos que contienen errores y que no pueden ser corregidos por la técnica de corrección de errores, en relación con el total de bloques transmitidos. Se expresa como:

$$\text{BLER} = \frac{Número\ de\ bloques\ con\ error\ detectado}{Número\ total\ de\ bloques\ transmitidos}$$

Un bloque es una unidad de datos codificada (Un bloque de transporte en LTE o 5G) que incluye bits de información y redundancia añadida mediante técnicas de codificación de canal. Durante la transmisión, los errores introducidos por el canal pueden hacer que un bloque no sea recuperable, incluso después de intentar la decodificación.

Importancia BLER:

1. Calidad del servicio (QoS): Un BLER alto implica una degradación en la calidad de transmisión, afectando servicios sensibles como voz o video.
2. Evaluación de la red: Es importante para optimizar parámetros como son la potencia de transmisión, modulación y codificación.
3. Pruebas de cobertura: En sistemas LTE y 5G, el BLER ayuda a determinar los límites de cobertura efectiva de la red.

Medición BLER: Se realiza con instrumentos de prueba específicas que evalúan los bloques transmitidos y verifican si fueron recibidos correctamente. Incluyen:

- Instrumentos de prueba: Analizadores de señal, generadores de tráfico o software especializado.

- Condiciones controladas: Para medir bajo escenarios como ruido añadido, diferentes niveles de señal o interferencias.

Instrumentos utilizados para medir BLER:

- Analizadores de señal y espectro:

  Fabricantes: Rohde & Schwarz FSW, Keysight UXA: Permiten analizar calidad de la señal RF y características: Modulación y nivel de señal.

- Emuladores de Red:

  Fabricantes: Keysight UXM, Rohde & Schwartz CMW500: Simulan entornos de red para generar y medir bloques de datos bajo condiciones controladas.

- Herramientas de drive test: Ejemplos: TEMS Investigation, Nemo outdoor. Recolectan datos de rendimiento de la red en entornos reales, incluyendo: BLER, SNR y otros KPIs.

- Software especializado: Ejemplos: Viavi CellAdvisor, EFO Wireless Network Test.

  Facilitan el análisis post-prueba, mostrando mediciones como el BLER junto con otros indicadores de calidad.

- Teléfonos inteligentes o módulos que soportan modos de prueba (Ejemplo: Qualcomm o MediaTek diagnostic tools)

Medición y análisis de potencia dinámica:

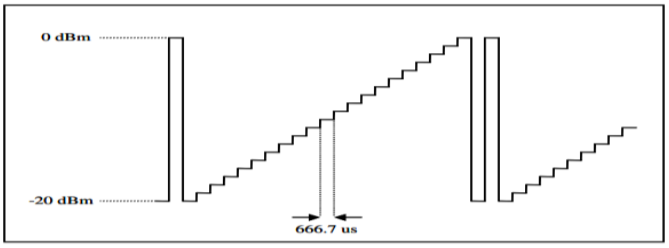


Fig. 43 Medición de análisis de potencia dinámica

Introducción: La potencia dinámica es la que un dispositivo emite durante la transmisión, ajustándose dinámicamente. Está en función de la distancia al receptor, condiciones del canal (ruido, interferencia), requerimientos de la red (control de potencia).

La medición del análisis de potencia dinámica en telecomunicaciones implica evaluar cómo cambia la potencia de una señal en función del tiempo, normalmente en sistemas inalámbricos. Este análisis es importante para garantizar que los transmisores (ejemplo, estaciones BTS o dispositivos móviles) mantengan la potencia dentro de límites aceptables según las demandas de cobertura, interferencia y calidad de servicio.

Instrumentos utilizados para medir la potencia dinámica:

- AE: Permite capturar y analizar la variación de la potencia a lo largo del tiempo.

  Fabricante: Rohde & Schwarz FSW, Keysight MXA.
- Medidor de potencia: Mide directamente la potencia transmitida.

  Fabricante: Bird 4, Keysight N1914A.

- Osciloscopio digital: Captura la envolvente de la señal para observar cóm fluctúa la potencia.
- Equipo probador de red: Simulan redes y miden el comportamiento dinámico de los dispositivos bajo condiciones reales.

Fabricante: Rohde & Schwarz CMW500, Keysight UXM.

Método para realizar el análisis de la potencia dinámica:

a. Configuración del entorno: Se define el sistema bajo prueba DUT.

b. Puede ser un transmisor, estación base o un dispositivo móvil.

c. Especificar las frecuencias y los estándares involucrados (LTE, 5G,)

Conexión del instrumento.

- Establecer un patrón de tráfico variable (voz, datos).
- Introducción de factores tales como desvanecimiento o ruido.

Medición:

a. Capturar la señal:

- Utilizar un AE para visualizar la potencia en función del tiempo.
- Configurar un rango dinámico lo suficientemente amplio para capturar picos/valles de potencia.

b. Analizar la envolvente de potencia:

c. En el osciloscopio se observa cómo varía la señal de RF en el tiempo. Muestra ajustes de potencia en respuesta al control dinámico del sistema.

d. Registrar picos y valores promedio y pico-a-promedio PAPR para evaluar la eficiencia del sistema.

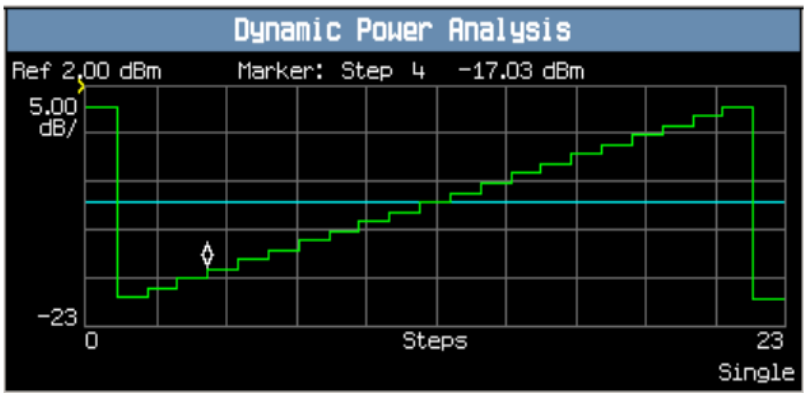


Fig. 44 Análisis de potencia dinámica

Interpretación de resultados:

Verificar la estabilidad: Analizar si la potencia se ajusta rápidamente sin causar distorsión o interferencia. Cumplir los estándares y compararlos con los requisitos. (Ejemplo: potencia máxima permitida en LTE o 5G).

Identificar problemas: Fluctuaciones irregulares pueden indicar problemas en el algoritmo de control de potencia o interferencias.

Ejercicio práctico: Analizar la potencia dinámica de un dispositivo LTE bajo diferentes condiciones.

Ejecutar:

1. Configurar AE para la banda LTE correspondiente.
2. Generar tráfico mediante un emulador de red.
3. Medir cómo responde el DUT a los cambios en la distancia simulada al receptor y evaluar resultados.

8. Conclusiones y Recomendaciones

No hay una metodología única de medición; los parámetros se adaptan a las variables que se desean medir y al contexto. Lo anterior es cierto en relación a mediciones exploratorias; por otro lado, los operadores de telefonía celular deben ajustarse a metodologías de medición dadas por los entes reguladores de cada país. En consecuencia, la metodología de medición es desarrollada por cada institución siguiendo las recomendaciones de la UIT y adaptándola a sus necesidades.

Las conclusiones luego de realizar mediciones de radiofrecuencia en una red de telecomunicaciones dependen del objetivo de las pruebas y los parámetros evaluados. Las más importantes:

- Calidad de la señal y cobertura: El nivel de señal determina si la potencia recibida es suficiente para un servicio óptimo en las áreas evaluadas. Las áreas de sombra identifican zonas con poca o nula cobertura. Deben planificarse mejoras.
- Rendimiento del sistema SNR: SE debe evaluar si la señal útil supera adecuadamente el ruido para garantizar una comunicación estable. Las interferencias debido a fuentes internas o externas pueden degradar la calidad de la señal.
- Ajustes en el diseño de la red: La optimización de antenas, determinan si la orientación, inclinación y ganancia de las antenas son las correctas. Con las frecuencias utilizadas. Se analiza si aparecen “solapamientos” que generan problemas (intermodulación o interferencias entre canales).
- Conformidad con estándares: Verificar si los parámetros de la red cumplen con regulaciones y estándares internacionales. Esto significa que la potencia máxima o uso el eficiente del espectro sea correcto.

- Identificación de problemas: Cuando hay desvanecimiento se detectan pérdidas de señal debido a obstáculos o fenómenos atmosféricos. Cuando se determinan problemas de modulación se verifica si el sistema está funcionando adecuadamente.

- Preparación para actualizaciones: Los datos obtenidos sirven como base para optimizar mejoras, tales como migraciones tecnológicas. Ejemplo de 4G a 5G o la instalación de nuevos equipos.

Referencias bibliográficas

Yücek, T., & Arslan, H. (2009). A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications. *IEEE communications surveys & tutorials*, *11*(1), 116-130.

Stremler, F. G. (1993). *Introducción a los sistemas de comunicación* (Vol. 3). Addison-Wesley Iberoamericana.

Huidobro Moya, J. M. (2011). Telecomunicaciones, Tecnologías, Redes y Servicios. Bogotá DC, Colombia: Ediciones de la U.

Lee, W. C. (1995). *Mobile cellular telecommunications: analog and digital systems*. McGraw-Hill Professional.

A Guide to Digital Television Systems and Measurements. Tektronix manual.

https://www.bing.com/search?q=A%20Guide%20to%20Digital%20Television%20Systems%20and%20Measurements.%20Tektronix

Fibush, D. K. (1997). A guide to digital television systems and measurements.

Cea Campos, Á. A. (2013). Diseño e implementación de un curso teórico y de un laboratorio sobre calidad en redes 3G y LTE.

Nano Edu (10 de octubre de 2018). *Introducción al análisis de tráfico de red con Wireshark.* https://www.youtube.com/watch?v=shp42M7gbDE

Pereira D. (19 de mayo del 2020). *Análisis de Tráfico de Red; Analisis de tráfico con Wireshark - Parte 1.* https://www.youtube.com/watch?v=gF_8mjClj34

Comisión de Regulación de Comunicaciones (2020). *Revisión de las metodologías para la medición en campo de parámetros de calidad de servicios móviles y fijos.* www.propuestas/doc_soporte_mediciones_en_campo.pdf

10. Anexos

Revista de Tecnología Volumen 13.

Metodología para realizar mediciones de radiación electromagnética de Telefonía celular.

Autores: Fabio Téllez, Carlos Lezama, Ernesto Sabogal.

www.Dialnet-MetodologiaParaHacerMedicionesDeRadiacionElectroma-6041600.pdf

Revisión de las metodologías para la medición en campo de parámetros de calidad de servicios móviles y fijos.

Autor: Comisión de Regulación de las Comunicaciones (2020)

https://www.bing.com/search?q=%20Revisi%C3%B3n%20de%20las%20metodolog%C3%ADas%20para%20la%20medici%C3%B3n%20