

Sondieren von zeitveränderlichen Funkkanälen im Zentimeter- oder Millimeterwellenbereich

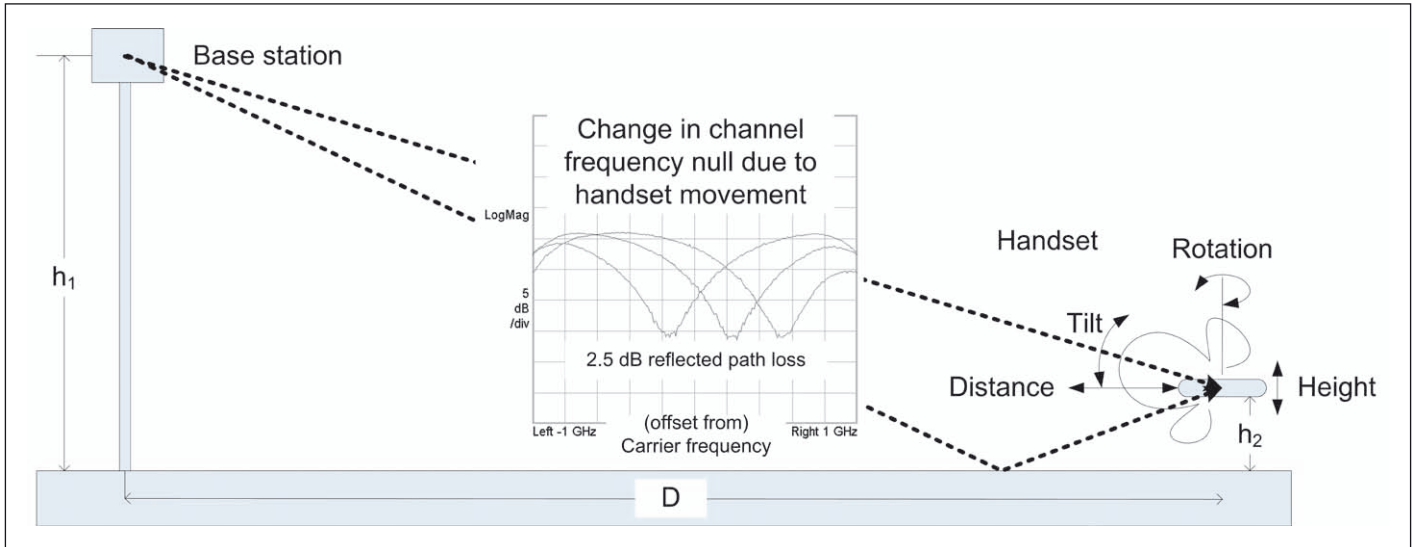


Bild 1: Ein Szenario mit einer Basisstation auf einem Laternenmast' demonstriert das grundsätzliche Problem eines Funkkanals mit veränderlichen Funkwegen aufgrund von Bewegung

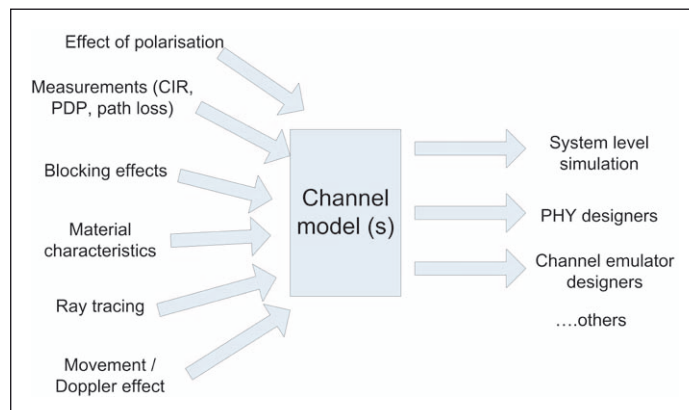


Bild 2: Beiträge zum Kanalmodell und Nutzer des Kanalmodells

Ein Viertel der Ressourcen "Bandbreite" und "Zeit" wird in einem Mobilfunknetz darauf verwendet, den Betrieb in den Funkkanälen zu steuern und aufrechtzuerhalten, also für Funktionen wie Sondieren des Kanals, Übertragung von Statusinformation, Entzerrung und Verfolgung des Mobilgeräts. Für die Planung eines funktionierenden Funksystems braucht man daher zwingend ein Verständnis des Funkkanals, der zum Spektrum, zum Antennendesign und zur Anwendung des Endanwenders passt. Wenn in diesem System Sender und Empfänger vieler verschie-

dener Anbieter eingesetzt werden (wie das bei 5G der Fall sein wird), muss man sich erst über Kanalmodell und Anwendungen einigen, bevor man sich ernsthaft an die Festlegung von Signalformen und die Konstruktion Geräten machen kann. Der vorliegende Artikel beschreibt, was man zum Verstehen und Modellieren von Funkkanälen braucht, speziell für solche über 6 GHz. Steigt die Trägerfrequenz, benötigt man in zunehmendem Maß Richtantennen, um die Dämpfung auf dem Funkweg zu kompensieren. Außerdem reagiert die Kanalantwort immer stärker auf

Bewegung. Das Szenario mit der Basisstation am Laternenmast in Bild 1 zeigt beispielhaft eine solche Situation. Genauso wie ein Signal in einem fehlangepassten Kabel reflektiert wird und frequenzabhängig eine Welligkeit der S21-Antwort verursacht, sorgen mehrere Übertragungswege im Funkkanal für eine frequenzabhängige Antwort.

Der Empfänger muss solche Änderungen durch ständiges Nachregeln seines Frequenzgangs kompensieren. Anders als bei einem Kabel können sich allerdings die Längen der beiden (oder mehrerer) Funkwege ändern, und sie werden das in der Realität auch tun. Wie in Bild 1 gezeigt, wird sich damit auch die Trägerfrequenz ändern, bei der sich die Signale mehrerer Wege gegenseitig auslöschen. Entweder muss die Übertragung abgeschlossen sein, bevor die Frequenz zu weit weggelaufen ist, oder der Empfänger muss sich entsprechend den Veränderungen nachregeln. Man muss all diese Effekte verstehen, damit man beurteilen kann, ob ein Modell des Funkkanals das darstellt, was in der Wirklichkeit passiert.

Peter Cain
Keysight Technologies
www.keysight.com

	Gleitender Korrelator	Gewobbeltes Dauerstrichsignal (Vektornetzwerkanalysator)	Breitbandübertragung mit korreliertem Sender und Empfänger
Vorteile	<p>Rückgewinnung des zugrunde liegenden statischen Kanals, wenn Bewegung korrekt ausgemittelt wird.</p> <p>Für ADC und Signalbearbeitung im Empfänger genügt eine kleine Bandbreite</p> <p>Erweiterung auf Mehrkanal (MIMO) möglich</p>	<p>Bei breitbandigen Durchläufen Rückgewinnung des zugrunde liegenden statischen Kanals möglich</p> <p>Langsame Durchläufe mit geringer Auflösungsbandbreite kommen mit hoher Dämpfung zurecht, vorausgesetzt, die Bewegung im Kanal wird korrekt ausgemittelt.</p>	<p>Kurze Messintervalle (nur wenige μs) ermöglichen eine Analyse in der Zeitebene mit hoher Auflösung</p> <p>Erweiterung auf Mehrkanal (MIMO) möglich.</p> <p>Verbindung zu Simulation und vollständiger Vektormessung ermöglicht Herausrechnen der Antenne.</p>
Grenzen	<p>Kann zeitabhängige Änderungen der Kanalparameter nicht messen</p> <p>Kann nur Amplitudeninformation messen.</p> <p>LO-Übersprechen kann den Dynamikbereich begrenzen</p>	<p>Kann zeitabhängige Änderungen der Kanalparameter nicht messen</p> <p>Erweiterung auf Mehrkanal (MIMO) unrealistisch, da Wobbeldurchläufe im Verhältnis zu lang dauern</p>	<p>Erfordert Messgeräte mit voller Bandbreite</p>
Anmerkungen	<p>Methode wurde entwickelt, als Echtzeitanalyse bei Bandbreiten von vielen GHz noch nicht praktikabel war.</p>	<p>Kundenspezifische Lösungen mit radar-ähnlicher Architektur sind im Gebrauch.</p>	<p>Kommerziell verfügbare Messgeräte mit Bandbreiten von 2 GHz und darüber ermöglichen Verbindung zu Hardwaredesign und Evaluationsphase.</p>

Tabelle 1: Vorteile und Grenzen von Messmethoden für Kanalmessungen

Zunächst vergleichen wir drei heute übliche Methoden zur Sondierung von Funkkanälen, bevor wir uns auf eine "Echtzeit"-Methode konzentrieren, die eine Analyse mehrerer zeitlich veränderlicher Kanäle erlaubt. Diese Methode liefert die beste Annäherung an die Signale, die in realen Funksystemen auftreten dürften. Im beschriebenen Beispiel gibt es weiterhin eine direkte Verbindung zwischen der Kanalmodellierung zu Beginn der Entwicklung und der darauf folgenden Entwicklung von Geräten und den Messungen an diesen.

Das Kanalmodell

Viel Arbeit wurde in die Entwicklung von Kanalmodellen für den Mobilfunk unterhalb von 6 GHz investiert. Es gibt auch Analysen von Beeinträchtigungen, die in Funkstrecken bei Wellenlängen im Zentimeter- bis Millimeterwellen-Bereich zwischen festen und beweglichen Teilnehmern auftreten, etwa

bei dem Innenraummodell für IEEE 802.11ad, das mit 60 GHz arbeitet. Der Einsatz von Zentimeter- und Millimeterwellen-Modellen im Mobilfunk hingegen ist Neuland. Wie in Bild 2 dargestellt, sind physikalische Messungen nur ein Beitrag zu einem Kanalmodell. Das Raytracing kommt von rauschbasierten Methoden. Eine Anpassung des Modells „WINNER II“ scheint ein günstiger Ansatz für 5G zu sein. Mit einer stärkeren Konzentration auf höheren Durchsatz und kürzere Reichweite mag IEEE 802.11ay einen anderen Ansatz darstellen.

Messmethoden

Von Hörnern mit schmaler Keule und hohem Antennengewinn bis hin zu Dipolen mit breitem Strahl oder verschiedenen Arrays: Die Wahl der Antenne hat so zu erfolgen, dass die im Signalpfad erwartete Dämpfung, die zu ermittelnden Parameter und die Messmethode berücksichtigt sind. Drei Typen Messungen

sind allgemein im Gebrauch, und zwar "gleitender Korrelator", "gewobbeltes Dauerstrichsignal" (Vektornetzwerkanalysator) und "Breitbandübertragung mit korreliertem Sender und Empfänger". Vor- und Nachteile dieser Methoden sind in Tabelle 1 aufgeführt. Alle drei Methoden brauchen unbedingt eine hochpräzise Synchronisation, um die Laufzeit im Kanal zu messen. Allerdings erlaubt der Einsatz eines Breitbandempfängers, der sich mit einem Signal bekannter Codierung synchronisieren kann, relative Messungen des Pfades ohne Triggerung.

Soweit Messungen betroffen sind, sind Zeitintervall und Dynamikbereich der Messantworten die wesentlichen Unterscheidungsmerkmale. Ist das Messintervall länger als die Kohärenzzeit des Kanals, kann eine Bewegung im Kanal nicht als solche erkannt werden, sondern sie sorgt lediglich für eine Unschärfe im Messergebnis. Der Dynamikbereich der Kana-

limpulsantwort-Messung (CIR, Channel Impulse Response) muss groß genug sein, damit signifikante Pfade im Kanal isoliert werden können (z.B. solche innerhalb eines 20-dB-Bereichs), und muss genügend Reserven haben, um Bewegungseffekte herausrechnen zu können. Jede dieser Methoden erfordert eine Kalibrierung, um eine ausreichend hohe-Messgenauigkeit sicherzustellen. (Hierauf wird in diesem Artikel allerdings nicht weiter eingegangen). Eine Validierung ist erforderlich, damit man die Grenzen der Messarchitektur versteht und alle Probleme erkennt, die unerwartet im Zuge der Implementation entstanden sind.

Gleitender Korrelator

Ein binär phasenmoduliertes BPSK-Signal, typischerweise eine PN-Sequenz, wird mit einem Takt in Höhe der Testbandbreite auf den HF-Träger moduliert. Im Empfänger wird die gleiche Sequenz, die auf

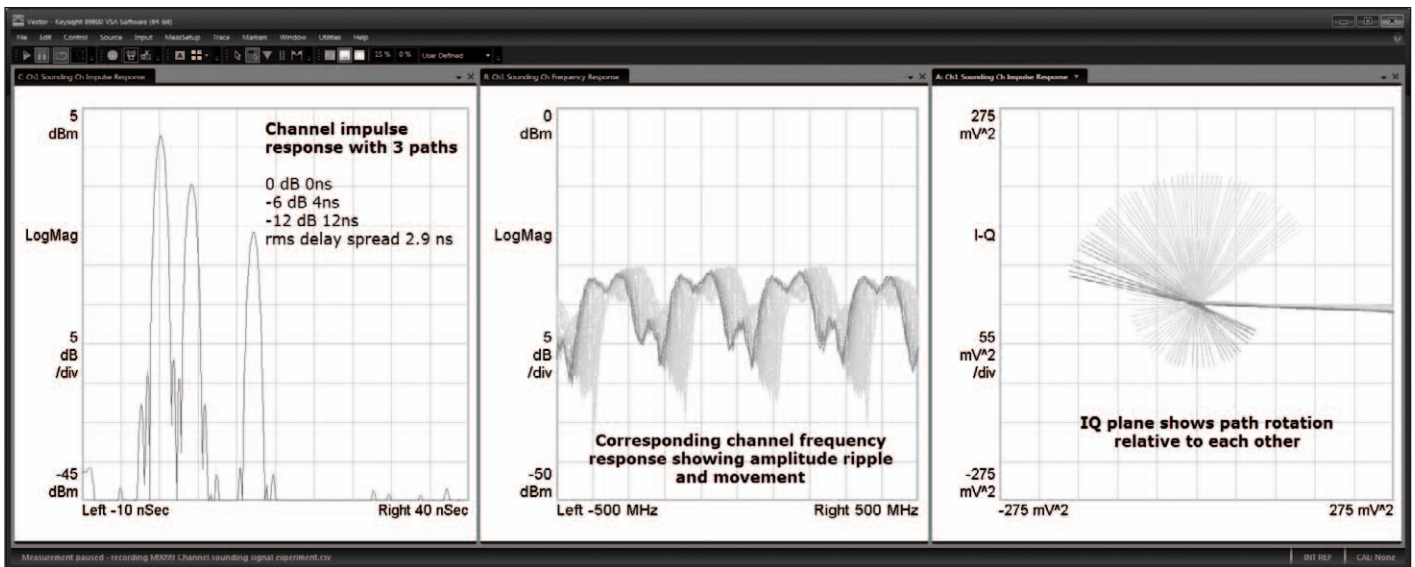


Bild 3: Bewegung während der Kanalmessung ist in der Impulsantwort (links) nicht klar zu erkennen, die Frequenzantwort des Kanals zeigt die Veränderung aber deutlich. Die Rotation der Pfade ist auch in der Vektordarstellung (IQ) rechts zu sehen

einer minimal unterschiedlichen Frequenz läuft, mit dem rückgewonnenen Signal gemischt. Diese Methode arbeitet im Grund ähnlich wie eine digitale Version eines Sampling-Oszilloskops. Das Sender- und das Empfänger-Frontend müssen beide die volle Bandbreite der gewünschten Sondierungsmessung aufweisen. Das heruntergemischte Signal und der DSP können weniger breitbandig sein. Wie bei einem Sampling-Oszilloskop baut sich das Ergebnis über eine längere Zeit auf (sofern das Signal vom Testobjekt, also dem Funkkanal, über eine hinreichend lange Zeit stabil ist), es ist vergleichbar mit einer Messung über die volle Signalbandbreite².

Gewobbeltes Dauerstrichsignal

Ein CW-Signal wird über die Testbandbreite gewobbel, und zwar mit einer Geschwindigkeit, die von den Möglichkeiten der Hardware abhängt. Sofern Spitzenpegel und Durchschnittspegel gleich sind, erleichtert dies das Sender-Hardware-Design. Die Empfangsfrequenz eines schmalbandigen Empfängers folgt dem Sender. Bei einem normalen Vektor-Netzwerkanalysator stecken Sender und Empfänger im gleichen Gehäuse und werden von dem gleichen gewobbelten Lokaloszillator gespeist. Damit

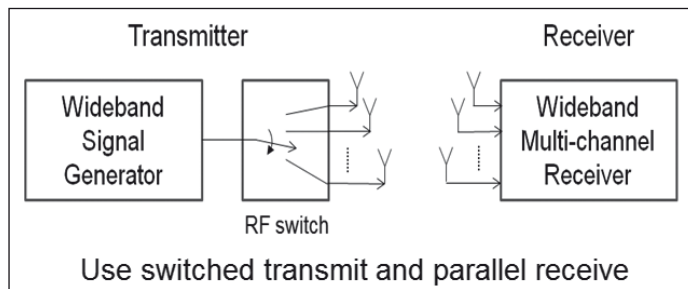


Bild 4: Praktischer Aufbau eines Breitband-Messsystems mit gemultiplextem Sender und mehreren parallelen Empfängern

ist die erforderliche Synchronisation automatisch gegeben. Wird mit einem Kanalprüfgerät gemessen, sind Sender und Empfänger separate Geräte, somit muss die Synchronisation speziell sichergestellt werden. Manchmal werden Glasfaserkabel mit einem abgesetzten Empfänger eingesetzt. Eine Alternative, die ohne Kabelverbindung zwischen Sender und Empfänger auskommt, arbeitet mit hochgenauer Signalerzeugung mittels DDS³.

Breitbandübertragung mit korreliertem Sender und Empfänger

Dieser Testsystemtyp (der auch der Referenzlösung zur Kanalsondierung⁴ von Keysight zugrunde liegt) ähnelt von der Funktion her einem Netzwerkvektoranalysator, erlaubt aber sehr kurze Messintervalle und

benötigt keine Kabelverbindung. Falls die absolute Verzögerung auf dem Pfad nicht interessiert, bedarf es keiner speziellen Maßnahmen, um Timing oder Frequenz von Sender und Empfänger synchron zu halten.

Während der gleitende Korrelator ein Signal mit aufgespreiztem Spektrum verwendet, muss das Signal bei diesem Verfahren auf den Empfänger zugeschnitten sein. Allgemeiner gesprochen kann man ein breitbandiges, sehr kurzes Testsignal mit einem kleinen Verhältnis von Spitzenleistung zu Durchschnittsleistung erzeugen, was nicht so hohe Ansprüche an die Linearität der Hardware stellt. Kurze Messintervalle ermöglichen das Multiplexen der Signalübertragung innerhalb der Kohärenzzeit des Kanals. Die Verwendung eines codierten Signals mit guter Autokorrelation ermöglicht

einen erheblichen Codiergewinn und Vektormittelung. Man kann daher flexibel Kompromisse beim Messintervall eingehen, um so den Dynamikbereich der Messung zu vergrößern.

Kanalantwortanalyse

Die Impulsantwort des Kanals (CIR, Channel Impulse Response) ist die interessanteste Messung. Damit ihre Ergebnisse interpretierbar sind, muss angegeben sein, mit welcher Antenne sie gemessen wurde. Eine ergänzende Rechnung ist das Leistungsverzögerungsprofil (PDP, Power Delay Profile). Es liefert einen Anhalt dafür, wie komplex die Mehrwegeumgebung ist, und möglicherweise, wie schwierig die Demodulation für einen Empfänger ist. Für ein vollständiges Bild braucht man noch die Bewegung des Kanals und das Verhältnis C/I und C/N.

MIMO

Es gibt eine Reihe von Gründen, Messungen mit mehr als einem Eingang und mehr als einem Ausgang durchzuführen. Die Notwendigkeit für Richtantennen bei Millimeter-Wellenlängen bedeutet, dass es neue Kanalcharakteristiken gibt, die sowohl die grundlegende Erkennung des Signals vor Strahlsteuerung als auch den Einsatz von MIMO beeinflussen. Mit rotierenden

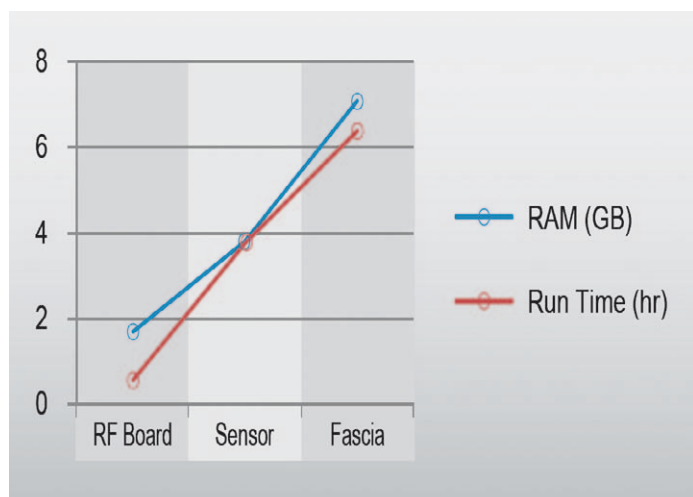


Bild 5: Variationen bei der Kanalantwort infolge eines Reflektors im Pfad, der sich alle 2 Sekunden um 45 Grad drehte, was eine Rotation des Trägers um 360 Grad alle 80 ms verursachte

Plattformen können Abstrahl- und Einfallswinkel gemessen werden, wenn der zugrundeliegende Kanal hinreichend stabil ist. Die MIMO-Kreuzpfadantwort kann aber nicht gemessen werden. Pfade aufgrund flüchtiger Effekte werden nicht erkannt. MIMO-Betrieb kann auch mittels unterschiedlicher Polarisation realisiert werden. Die Testverfahren lassen sich auf solche Implementierungen übertragen. Bild 4 zeigt den Aufbau eines für Mehrkanalmessungen geeigneten Breitbandsystems.

Beispiel für eine Labormessung

Die Änderung der Kanalantwort infolge der Rotation eines Reflektors im Pfad kann man in Bild 5 deutlich sehen. Die Inter-

aktion mit anderen Reflexionen bei der Benutzung offener Hohlleiterantennen ist komplex, sogar über eine Distanz von wenigen Metern.

Einzelnachweise

- 1: *IEEE Contribution: Small scale fading: IEEE 802.11-14/1486r0*
- 2: *IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 7, No. 9, Sept 2008: Optimal Sliding Correlator Channel Sounder Design*
- 3: *Wiley: Radio Propagation Measurement and Channel Modelling. Salous*
- 4: www.keysight.com/find/5G

Zusammenfassung

Messungen in Millimeterwellen-Kanälen bringen wichtige Einsichten in Effekte, mit denen Funkssysteme in der Wirklichkeit werden zurechtkommen müssen. Man benötigt sie auch für die Entwicklung von Kanalmodellen, die die Branche braucht, um für 5G neue Signaltypen zu entwickeln, zusammen mit den zugehörigen Antennen-

systemen und Funkgeräten. Der vorliegende Artikel zeigt, wie unterschiedliche Methoden zum Sondieren von Funkkanälen dazu beitragen, dass wir das Verhalten von Millimeterwellen-Kanälen besser verstehen, und mehr noch, dass Methoden, die mit bereits verfügbaren Messgeräten arbeiten, einen tiefen Einblick in das Verhalten solcher Funkkanäle geben.