

Spectrum Sensing für DVB-T2

Stefan Ilsen, Piotr Palka, Institut für Nachrichtentechnik, TU Braunschweig, Braunschweig, Deutschland
{ilsen,palka}@ifn.ing.tu-bs.de

Kurzfassung

Lokal von terrestrischen Fernseh-Sendernetzen nicht genutztes Spektrum, auch als TV White Spaces bezeichnet, stellt eine vielversprechende Ressource für zukünftige breitbandige Kommunikationsdienste dar. Wenn sekundäre Spektrumsnutzer auf die TV-Frequenzen zugreifen wollen, muss gewährleistet sein, dass Fernsehempfänger nicht durch unzulässig hohe Interferenzen gestört werden. Eine Möglichkeit, TV White Spaces zu erkennen, bietet Spectrum Sensing. Hierbei tasten die Geräte der Sekundärnutzer das Spektrum ab und treffen autonom die Entscheidung, ob in der Region in einem gegebenen Kanal ein TV-Signal empfangbar ist oder nicht.

Im vorliegenden Aufsatz werden erstmalig unterschiedliche Spectrum-Sensing-Verfahren für die neueste Generation des terrestrischen Fernsehens, DVB-T2, untersucht. Da einige der Verfahren die Signalstruktur der digitalen Fernsehsignale auswerten, mussten sie für den Einsatz für DVB-T2 zum Teil neu entwickelt werden. Es wird ein Überblick über die Funktionsweise der einzelnen Algorithmen gegeben. Simulationsergebnisse ermöglichen einen Vergleich der Leistungsfähigkeit der unterschiedlichen Ansätze.

1. Einleitung

Die Einführung neuer drahtloser Kommunikationssysteme unterliegt häufig der Einschränkung, dass dafür notwendige Frequenzen nicht zur Verfügung stehen. Andererseits weisen einige Frequenzbereiche, die exklusiv von bestimmten Anwendungen verwendet werden, eine Unterauslastung auf. So finden sich zum Beispiel im Bereich des terrestrischen Fernsehfunks die sogenannten *TV White Spaces* – von den Fernsehsendernetzen lokal nicht genutzte Frequenzbänder. Diese bislang nicht erschlossenen Frequenzressourcen könnten unter bestimmten Umständen durch Sekundärnutzer verwendet werden, ohne dabei Störungen bei Fernsehempfängern zu verursachen.

Um diese effiziente Ausnutzung knapper Ressourcen zu erreichen, bedarf es einer gut durchdachten Frequenzregulierung sowie eines funktionierenden Frequenzmanagement-Systems. Andererseits kann jedoch ein Teil der dafür erforderlichen „Intelligenz“ auf die Seite der Übertragungssysteme und Endgeräte verlagert werden. Hier setzt das Prinzip des *Cognitive Radios* an, in dem drahtlose Kommunikationssysteme selbstständig erkennen können, in welcher Umgebung sie eingesetzt werden, aus ihren Beobachtungen lernen und ihre Systemparameter zur Optimierung von Effizienz und Zuverlässigkeit anpassen können [1].

Ein Teilaspekt von Cognitive Radio ist das sogenannte *Spectrum Sensing*, welches eine Möglichkeit darstellt, die „Lücken“ im Spektrum ausfindig zu machen. Hierbei tastet ein White-Space-Gerät seine elektromagnetische Umgebung ab und prüft diese auf das mögliche Vorhandensein eines primären Nutzsignals. Wenn unterhalb eines definierten Schwellenwertes kein Primärnutzer detektiert wird, gilt das untersuchte Frequenzband als verfügbar.

Bisherige Untersuchungen von Spectrum-Sensing-Verfahren im Bereich der TV White Spaces gehen von älteren TV-Systemen wie DVB-T oder ATSC aus. Im vorliegenden Aufsatz werden hingegen verschiedene

Algorithmen zur Erkennung des neuesten TV-Standards DVB-T2 [2] untersucht. Diese Algorithmen greifen zum Teil auf die physikalische Übertragungsschicht der DVB-T2-Signale zu und wurden speziell für diese Untersuchung entwickelt. Die Untersuchung wurde im Rahmen des Forschungsprojektes „Dynamic Broadcast“ [3][4], in dem eine möglichst effiziente Nutzung des terrestrischen Fernsehenspektrums im Mittelpunkt steht, durchgeführt. Ziel dieser Arbeit ist es, einen Überblick über die vielfältigen Verfahren zu schaffen. Simulationsergebnisse veranschaulichen die Leistungsfähigkeit der verschiedenen Ansätze und die Funktionsfähigkeit unter realen Bedingungen wird ebenfalls diskutiert. Je nach Anwendungsfall können unterschiedliche Algorithmen besser geeignet sein. Die Gegenüberstellung soll daher eine Entscheidungshilfe bei der Wahl eines Verfahrens bieten.

Der Aufsatz gliedert sich wie folgt: In Kapitel 2 werden grundlegende Eigenschaften von Sensing-Verfahren erläutert und darüber hinaus, Anforderungen und Vergleichskriterien definiert. Kapitel 3 stellt die Implementierungen der Verfahren vor. In Kapitel 4 wird auf die Versuchsdurchführung eingegangen. Die Ergebnisse der Untersuchung werden in Kapitel 5 vorgestellt und anschließend in Kapitel 6 zusammengefasst.

2. Spectrum Sensing

Eine Fehlentscheidung eines selbstständig agierenden TV-White-Space-Geräts führt im schlimmsten Fall zu Störungen bzw. dem Ausfall des Fernsehempfangs. Um Interferenzen bei den Fernsehempfängern zu vermeiden, werden an Spectrum-Sensing-Verfahren daher sehr hohe Anforderungen gestellt. Eine zuverlässige Erkennung der Fernsehsignale soll auch bei sehr niedrigen Signal-Rauschabständen (S/N) weit unterhalb des thermischen Rauschpegels möglich sein. Das *Hidden-Node-Problem* wird zur Veranschaulichung dieses Sachverhalts häufig herangezogen. Bei diesem Anwendungsszenario wird der direkte Signalpfad zwischen einem Fernsehsender und

einem White-Space-Gerät durch ein Hindernis (z.B. eine Wand) blockiert, wodurch die empfangbare Signalleistung sehr gering ist. Dies kann zu der falschen Annahme führen, es gäbe in der Region keinen aktiven Primärnutzer in dem untersuchten Frequenzbereich. Die Inbetriebnahme des White-Space-Gerätes kann jedoch zu Störungen von in der Nähe befindlichen TV-Empfängern führen, die nicht durch das Hindernis abgeschattet werden.

Um die hohe Empfindlichkeit zu gewährleisten (üblicherweise bei einem S/N von bis zu -20 dB), wurden zum Teil sehr komplexe Algorithmen entwickelt, die bestimmte Signaleigenschaften, wie etwa Periodizitäten, detektieren können. Der robusten Detektionsfähigkeit steht jedoch die Anforderung gegenüber, möglichst wenig Rechenleistung zu beanspruchen, da die Sensing-Algorithmen vor allem in mobilen Endgeräten eingesetzt werden sollen. Die Geschwindigkeit der Erkennung spielt ebenso eine wichtige Rolle, so dass eine längere zeitliche Mittelung von Signalen problematisch sein kann. Diese Aspekte gilt es, bei der Analyse verschiedener Verfahren zu berücksichtigen.

2.1. Bewertungskriterien von Spectrum-Sensing-Verfahren

Die Aufgabe eines Sensing-Gerätes kann vereinfachend durch einen binären Hypothesentest beschrieben werden [5]. Der verwendete Algorithmus führt hierbei anhand diskreter Beobachtungen (bzw. Abtastwerte) und einer daraus ermittelten Teststatistik zu einer Entscheidung für eine der beiden Hypothesen \mathcal{H}_1 (Primärnutzer vorhanden) oder \mathcal{H}_0 (Primärnutzer nicht vorhanden). Die Teststatistik ist eine abgeleitete Größe, deren Bestimmung je nach Verfahren mehr oder weniger rechenintensiv ist.

Da den gemessenen Signalen Rauschen überlagert ist, führt der Vergleich der berechneten Metrik mit einer Entscheidungsschwelle zu einer gewissen Fehlerwahrscheinlichkeit. Die Leistungsfähigkeit verschiedener Sensing-Verfahren lässt sich daher u.a. durch die Angabe der Fehlerrate P_{MD} (*probability of missed detection*) abschätzen, die angibt, in wie vielen Fällen ein vorhandenes Primärsignal nicht detektiert wurde.

Der umgekehrte Fall, nämlich dass durch die Beobachtungen fälschlicherweise ein Primärsignal erkannt wird, das nicht vorhanden ist, lässt sich durch die Fehlalarmrate P_{FA} (*probability of false alarm*) beschreiben. Während eine hohe Fehlerrate zu unzulässigen Interferenzen für den Fernsehempfang führt, reduziert eine hohe Fehlalarmrate die Nutzbarkeit grundsätzlich verfügbarer TV White Spaces.

Trägt man bei konstantem S/N die Fehlerrate gegen die Fehlalarmrate auf, so erhält man eine systembedingte Kennlinie, die als ROC-Kurve (*receiver operating characteristic*) bezeichnet wird und als Bewertungskriterium für Sensing-Geräte herangezogen werden kann (siehe Bild 1). Üblicherweise wird jedoch bei der Gegenüberstellung verschiedener Sensing-Verfahren eine feste Fehlalarmrate (z. B. 10 %) eingestellt, sodass die Empfindlichkeiten für unterschiedliche S/N-Werte verglichen werden können.

Weiterhin ist es für die Bewertung der Leistungsfähigkeit

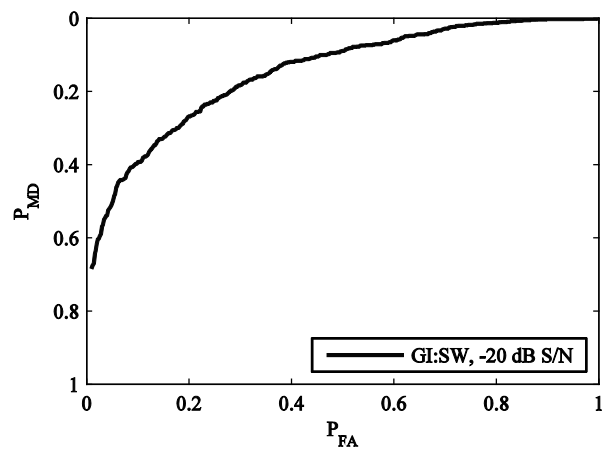


Bild 1 Beispiel einer ROC-Kurve: Ergebnis für das Sliding Window-Verfahren für Testfall 1 bei -20 dB S/N

verschiedener Sensing-Verfahren mittels Computersimulationen wichtig, zu überprüfen, wie robust sie sich bei real zu erwartenden Störungen verhalten. Unter realen Empfangsbedingungen spielen neben Fading-Effekten vor allem Ungenauigkeiten der Frequenzsynchronisation und der Abtastrate eine große Rolle. So erzielen manche Verfahren unter Laborbedingungen gute Ergebnisse, schneiden jedoch schlecht ab, wenn ein Frequenz-Offset zum Tragen kommt. Des Weiteren ist auf akkubetriebenen mobilen Endgeräten die Rechenleistung ein kritischer Gesichtspunkt. Die Rechenkomplexität sollte daher als zusätzliches Bewertungskriterium Berücksichtigung finden.

2.2. Besonderheiten beim Sensing von DVB-T2

Wie bei seinem Vorgänger DVB-T handelt es sich bei DVB-T2 um eine OFDM-basierte Funkübertragung. Es liegt daher nahe, dass viele der zuvor verwendeten Sensing-Verfahren hier ebenfalls eingesetzt werden können. Andererseits greifen die meisten Verfahren, die eine hohe Detektionsfähigkeit besitzen, gezielt auf Eigenschaften der physikalischen Übertragungsschicht der Fernsehsignale zu. Daher ergeben sich gegenüber DVB-T einige Änderungen bei DVB-T2, die Sensing-Geräte zum einen vor neue Herausforderungen stellen, zum anderen jedoch auch neue Detektionsmöglichkeiten schaffen.

Die größte Schwierigkeit bei der Detektion von DVB-T2-Signalen besteht in der großen Vielfalt und Flexibilität, die der Standard vorsieht. Viele Kombinationsmöglichkeiten aus verwendeten FFT-Größen (1K bis 32K), Guard-Intervallen, Framelängen und der Struktur von Signalisierungsinformationen erfordern anpassungsfähige Erkennungsalgorithmen. Vorkenntnisse über die in einem Sendebereich verwendeten Modi sind erforderlich. Neue Möglichkeiten bestehen in der Erkennung von neuen bei DVB-T2 verwendeten Datenstrukturen, wie etwa den P1-Symbolen.

Für eine vollständige Beschreibung der vorgestellten Algorithmen wird eine umfassende Kenntnis des DVB-T2-Standards benötigt. Der vorliegende Aufsatz beschränkt sich daher auf die grundlegenden Eigenschaften der Verfahren. Für einen tieferen Einblick wird auf weiterführende Literatur, vor allem auf [6] verwiesen.

3. Sensing-Verfahren

In diesem Abschnitt sollen die betrachteten Sensing-Verfahren in ihrer Funktionsweise vorgestellt werden. Dabei werden insbesondere auch die Anforderungen und Grenzen der einzelnen Verfahren benannt.

3.1. Energiedetektion

Bei der *Energiedetektion* [7] handelt es sich um ein einfaches Sensing-Verfahren, bei dem die Leistung des empfangenen Signals mit einem aus der geschätzten Rauschleistung abgeleiteten Grenzwert verglichen wird.

Die Leistungsfähigkeit der Energiedetektion ist dadurch von der Güte der Rauschleistungsschätzung abhängig. Bei einer im praktischen Einsatz zu erwartenden nicht perfekten Schätzung kann auch durch eine lange zeitliche Mittelung die Empfindlichkeit des Detektors nicht über ein definiertes Maß verbessert werden. Dieser Effekt wird als *SNR-Wall* [8] bezeichnet und schränkt die Leistungsfähigkeit des Verfahrens stark ein.

Die Energiedetektion gehört zu den Verfahren, die keine impliziten Eigenschaften des zu erkennenden Signals nutzen. Eine Unterscheidung verschiedener Übertragungsverfahren ist daher nicht möglich.

3.2. Erkennung der Guard-Intervalle

DVB-T2 nutzt wie die meisten OFDM-basierten Übertragungsverfahren ein Guard-Intervall (zyklisches Präfix) zum Schutz vor Intersymbol-Interferenzen, die vor allem durch Mehrwegeausbreitungseffekte oder in Gleichwellennetzen (SFN) entstehen können. Daher bietet es sich zur Signaldetektion und Synchronisation an, die Wiederholungen im zeitlichen Signalverlauf über eine Korrelation zu detektieren.

Dazu wurden verschiedene Algorithmen definiert, die sämtlich auf dem komplex konjugierten Produkt des Signals und seiner zeitlich verschobenen Kopie im Guard-Intervall basieren. Dieses Produkt wird von den Verfahren auf unterschiedliche Art und Weise verwendet und wird häufig als *Sample Value Product* (SVP) bezeichnet.

Die auf der Erkennung des Guard-Intervalls basierenden Verfahren sind empfindlich gegenüber Abweichungen in der Abtastfrequenz. Dieser Effekt wird insbesondere bei großen FFT-Modi deutlich, die bei DVB-T2 möglich sind.

3.2.1. Sliding Window-Verfahren

Das *Sliding Window*-Verfahren [7] bildet einen gleitenden Mittelwert aus den SVPs, wobei die Anzahl der Werte im betrachteten „Fenster“ dem Guard-Intervall entsprechen sollte. Das Ergebnis der Berechnung hat einen dreieckförmigen Verlauf, dessen Maximum sich bei einer genauen Überlagerung von Guard-Intervall und „Fenster“ befindet und für die Entscheidung gewählt wird. Zur Verbesserung der Empfindlichkeit des Verfahrens ist es möglich, die SVPs über mehrere Symbole zu mitteln. Die Komplexität des Verfahrens ist recht gering, es ist jedoch zwingend das Wissen über den verwendeten FFT-Modus erforderlich.

Idealerweise sollte auch die Länge des Guard-Intervalls bekannt sein.

3.2.2. Detektion auf Basis einer Autokorrelation

Mit der *Autocorrelation-based Detection* [7] wurde ein Verfahren implementiert, das eine Summe über die SVPs und damit eine Art Autokorrelation realisiert, bei der die Länge des Guard-Intervalls nicht bekannt sein muss. Da zusätzlich die mittlere Energie der Abtastwerte in die Berechnung einbezogen wird, funktioniert das Verfahren unabhängig von einer präzisen Rauschleistungsschätzung. Die Komplexität ist vergleichbar mit der des Sliding Window-Verfahrens.

3.2.3. Detektion auf Basis der Momente zweiter Ordnung

Das in [9] als *Detection based on empirical second order statistics* aus einem *Generalized Likelihood-Ratio Test* (GLRT) empirisch hergeleitete Verfahren funktioniert ebenfalls ohne eine präzise Schätzung der Rauschleistung. Dabei wird aus verschiedenartigen Summen des SVP eine aufwendige Testmetrik gebildet, die insbesondere die Änderung des SVP auswerten soll.

Die Komplexität dieses Verfahrens ist vom verwendeten FFT-Modus abhängig und dadurch besonders bei den bei DVB-T2 eingeführten großen Modi im Vergleich zu den anderen Guard-Intervall-basierten Verfahren enorm.

3.3. P1-Korrelation

Die Framestruktur von DVB-T2 sieht vor, dass jeder maximal 250 ms lange T2-Frame mit einem P1-Symbol beginnt, das zur Synchronisation der Empfänger genutzt werden kann und außerdem erste Signalparameter enthält. Das P1-Symbol besteht dabei aus einem Nutzdatenteil sowie aus zwei frequenzverschobenen Guard-Intervallen, die vor und nach dem Nutzdatenteil übertragen werden.

Die DVB-T2 Implementation Guidelines [10] enthalten ein Verfahren, mit dem das P1-Symbol im Signalverlauf erkannt werden kann. Dies arbeitet ähnlich dem Sliding Window-Verfahren, wobei in diesem Fall zwei Guard-Intervalle genutzt werden können. Dabei muss jedoch zunächst der Frequenzversatz der beiden Guard-Intervalle korrigiert werden.

Das Verfahren ist wenig rechenaufwendig und recht robust gegenüber Abweichungen von Abtastrate und Mittenfrequenz im Empfänger. Bei den für eine fehlerfreie Decodierung des DVB-T2-Signals im TV-Empfänger nötigen S/N-Werten ist dieses Verfahren vollkommen ausreichend, um das Signal vor der eigentlichen Decodierung erkennen zu können. Die Erkennungsleistung ist jedoch im Vergleich zu anderen Sensing-Verfahren recht gering und erfüllt nicht die in Abschnitt 2 genannten Empfindlichkeitsanforderungen.

Bei der Detektion auf Basis von P1-Symbolen ist zu beachten, dass diese nur zu Beginn jedes T2-Frames übertragen werden, also mindestens alle 250 ms (bzw. 500 ms bei Verwendung von *Future Extension Frames*) [2]. Daher

kann ein Sensing-Gerät in diesem Zeitintervall nur eine einzige Entscheidung treffen. Dies ist insbesondere im Hinblick auf den Rechenaufwand kritisch, da in jedem Fall das gesamte Intervall ausgewertet werden muss.

3.4. Time-Domain Symbol Cross-Correlation

Bei der *Time Domain Symbol Cross-Correlation* (TDSC) [11] handelt es sich um ein Verfahren, bei dem eine Kreuzkorrelation zwischen OFDM-Symbolen mit gleichen Positionen der Pilotträger im Frequenzbereich gebildet wird. Im Gegensatz zu denen bei DVB-T verändern sich die Modulationswerte der Pilotträger bei DVB-T2 zwischen den relevanten OFDM-Symbolen, wodurch sich das Detektionsergebnis verschlechtert. Außerdem wird die regelmäßige Abfolge der OFDM-Datensymbole durch das P1- sowie die P2-Symbole unterbrochen. In der Versuchsauswertung in Abschnitt 5 zeigt sich daher ein deutlich schlechteres Ergebnis, als für DVB-T berichtet wurde [11]. Da DVB-T2 über die Definition verschiedener *Pilot Pattern* Möglichkeiten besitzt, die Position und Dichte der Pilotträger zu variieren, ist eine unterschiedliche Leistungsfähigkeit des Verfahrens je nach verwendeten Pilot Pattern zu erwarten.

3.5. Kreuzkorrelation mit Testsequenzen

Durch die Kreuzkorrelation des abgetasteten Eingangssignals mit Testsequenzen können Übereinstimmungen im Signalverlauf erkannt werden. Dazu werden im Folgenden Sequenzen auf der Basis von Pilotträgern oder dem P1-Symbol vorgestellt, die im Zeitbereich zur Korrelation genutzt werden können.

Nachteile der Kreuzkorrelation liegen in der großen Rechenkomplexität bei längeren Testsequenzen, die für eine gute Detektionsleistung notwendig sind. Insbesondere bei der Verwendung von Testsequenzen auf der Basis von Pilotträgern ergibt sich außerdem eine Empfindlichkeit gegenüber Frequenzverschiebungen. Eine dynamische Korrektur der Mittenfrequenz des Empfängers ist bei den relevanten S/N-Werten nur schwer möglich.

3.5.1. Pilotträger als Testsequenz

Für die Detektion von DVB-T wurde in [7] und [12] vorgeschlagen, zur Korrelation eine Testsequenz zu erstellen, bei der nur die OFDM-Pilotträger ihre im Standard fest definierten Modulationswerte erhalten und alle anderen Träger zu 0 gesetzt werden. Um den Rechenaufwand reduzieren zu können, ist es außerdem möglich, die Eingangsdaten über mehrere Symbole mit jeweils gleichen Pilotträger-Positionen zu mitteln [12] und so weniger Kreuzkorrelationspunkte berechnen zu müssen.

Die Pilotträger als Testsequenz lassen sich auch zur Detektion von DVB-T2 verwenden. Dabei existiert jedoch die Einschränkung, dass dem Sensing-Gerät zusätzlich zum FFT-Modus das verwendete Pilot Pattern bekannt sein muss, um eine optimale Testsequenz erstellen zu können. Es ist jedoch davon auszugehen, dass diese

Konfigurationsparameter in der Regel nicht dynamisch verändert werden. Durch die bereits in Abschnitt 3.4 beschriebene Variation der Modulationswerte der Pilotträger ist jedoch auch bei diesem Verfahren eine gegenüber dem Einsatz mit DVB-T leicht geringere Leistungsfähigkeit zu erwarten.

3.5.2. P2-Pilotträger als Testsequenz

Im Gegensatz zu den Datensymbolen sind die Pilotstruktur der P2-Symbole sowie deren Modulationswerte während der Übertragung konstant. Weil zusätzlich in den P2-Symbolen auch mehr Pilotträger als in den Datensymbolen verwendet werden bietet es sich an, explizit die P2-Symbole über die Pilotstruktur zu suchen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass in diesem Fall keine Mittelung der Eingangsdaten über mehrere OFDM-Symbole zur Reduktion des Rechenaufwands durchgeführt werden kann. Da die P2-Symbole nur am Anfang des T2-Frames einmal übertragen werden, gelten auch hier die in Abschnitt 3.3 genannten Einschränkungen, dass die Detektion nur einmal pro T2-Frame geschehen kann und daher in jedem Fall 250 ms bzw. 500 ms im Signalverlauf ausgewertet werden müssen.

3.5.3. P1-Symbole als Testsequenz

Neben der Verwendung von Testsequenzen basierend auf der Pilotträgerstruktur ist es auch möglich, ein synthetisches P1-Symbol zur Detektion zu verwenden. Dieses muss abhängig von einigen Konfigurationsparametern aus den Signalisierungsdaten des P1-Symbols generiert werden. Dazu sind im Empfänger Kenntnisse über den verwendeten DVB-T2-Modus, den FFT-Modus, die Länge des Guard-Intervalls der DVB-T2-Übertragung sowie über das sogenannte Mixed-Bit nötig [2].

Durch den Aufbau des P1-Symbols ergibt sich im Vergleich zu den Pilotträger-basierten Testsequenzen eine größere Robustheit gegenüber Frequenzoffsets. Durch die potenziell größere Übereinstimmung von Empfangssignal und Testsequenz ist im Vergleich zu den Pilotträger-basierten Testsequenzen außerdem ein besseres Verhältnis von Rechenaufwand und Detektionsleistung zu erwarten.

4. Versuchsdurchführung

Um die Leistungsfähigkeit der betrachteten Verfahren bewerten zu können, wurden Simulationen mit künstlich verauschten Messdaten durchgeführt, wobei das S/N in 2 dB-Schritten variiert wurde. Neben den Sensing-Verfahren wurde dazu auf der Basis des am Institut für Nachrichtentechnik entwickelten DVB-T2-Softwareempfängers ein Testframework in C++ implementiert. Dieses Framework liest vorher aufgezeichnete Datenströme als IQ-Daten ein, die anschließend entsprechend der Konfiguration verauscht werden, um einen AWGN-Kanal (Additive White Gaussian Noise) zu simulieren. Im Programmablauf folgen darauf eine Abstratenwandlung und die implementierten Sensing-Verfahren sowie die Ausgabe der Ergebnisse.

Der Testdatenstrom wurde mit einem Rohde & Schwarz SFU Signalgenerator erzeugt, mittels eines Rohde & Schwarz TSMW abgetastet und auf einer Festplatte gespeichert.

Für die Simulationen wurden Übertragungsparameter gewählt, die einem der drei im „DVB-T2-Modellversuch Norddeutschland“ vorgeschlagenen Einföhrungsszenarien für DVB-T2 in Deutschland entnommen wurden [13]. Der gewählte Modus eignet sich für den portablen Empfang von DVB-T2:

- FFT-Modus: 16K, Extended Carrier Mode
- Relative Guard-Intervall-Länge: 19/128
- Pilot Pattern: PP2

Die für Sensing-Entscheidungen nötigen Grenzwerte wurden für die Versuche nicht mit den teilweise für die Verfahren angegebenen Formeln bestimmt, sondern empirisch durch die Analyse von Rauschen ohne Nutzsinal optimiert. Dabei wurde jeweils ein Grenzwert gesucht, der für eine große Anzahl von Sensing-Entscheidungen (1000) die jeweils definierte Ziel-Fehlalarmrate möglichst genau erfüllt.

Um den Einfluss der Rauschleistungsschätzung auf die verschiedenen Verfahren untersuchen zu können wurden in den Simulationen Grenzwerte sowohl für eine perfekte Rauschleistungsschätzung ermittelt (Testfall 1), als auch für eine Abweichung der Schätzung um 1 dB (Testfall 2). Außerdem wurde eine Simulation mit realen Messdaten aus dem „DVB-T2-Modellversuch Norddeutschland“ durchgeführt, um auch den Einfluss von realen Übertragungskanälen auf die Signaldetektion beobachten zu können (Testfall 3). Die Messung erfolgte während einer Autobahnfahrt zwischen den zwei Testsendern, die in einem Gleichwellennetz betrieben wurden.

5. Ergebnisse

Im Folgenden werden die Empfindlichkeiten der beschriebenen Verfahren analysiert, indem die Fehlerraten P_{MD} bei verschiedenen Signal-Rauschverhältnissen für einen simulierten AWGN-Kanal dargestellt werden. Dabei wurden pro Messpunkt jeweils 1000 Sensing-Entscheidungen zugrunde gelegt, für die jeweils maximal 50 ms des Signalverlaufs ausgewertet wurden. Die ausgewählte Ziel-Fehlalarmrate betrug 10 %.

Bild 2 zeigt das Sensing-Ergebnis für Testfall 1. Die Energiedetektion sowie die beiden Pilotträger-basierten Kreuzkorrelationsverfahren erkennen das Signal bei -22 dB S/N noch nahezu perfekt und erfüllen damit die in Kapitel 2 genannten Anforderungen einer Detektion bei -20 dB S/N. Die Guard-Intervall-basierten Verfahren sowie die Korrelation mit dem vergleichsweise kurzen P1-Symbol ermöglichen immerhin noch eine zuverlässige Detektion zwischen -16 dB und -18 dB S/N, während die simple P1-Korrelation sowie die TDSC deutlich weniger empfindlich sind und damit die strengen Anforderung nicht erfüllen. Dabei ist zu beachten, dass insbesondere für das Sliding Window-Verfahren und die Autokorrelation-basierte Detektion ein wesentlich geringerer Rechenauf-

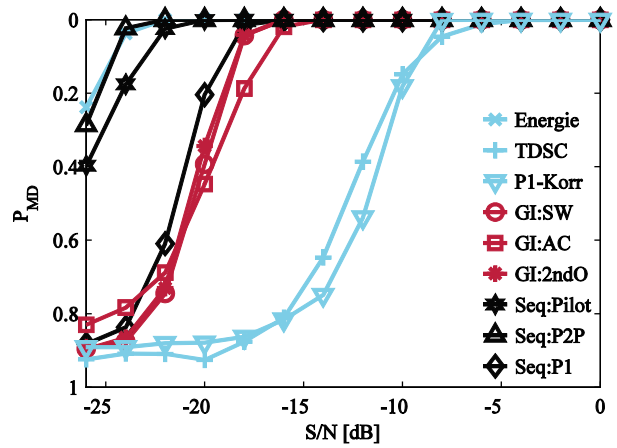


Bild 2 Detektionsergebnisse für Testfall 1: Synthetische Testdaten, ideale Rauschleistungsschätzung

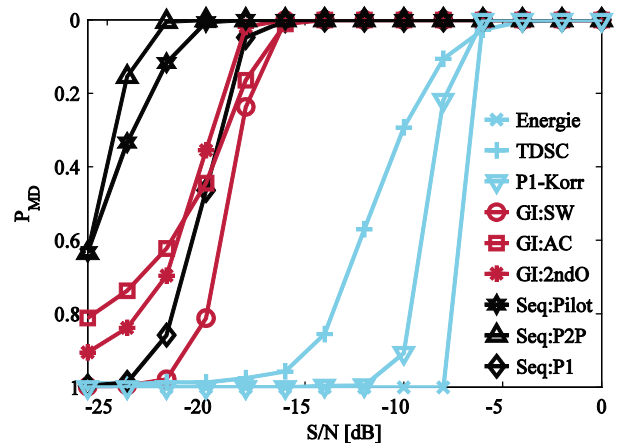


Bild 3 Detektionsergebnisse für Testfall 2: Synthetische Testdaten, um 1 dB abweichende Rauschleistungsschätzung

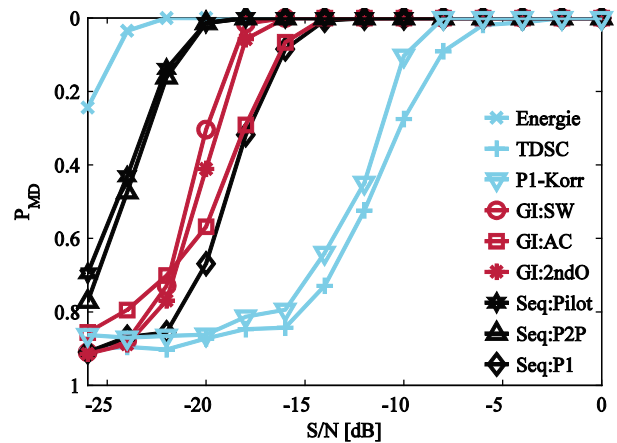


Bild 4 Detektionsergebnisse für Testfall 3: Testdaten aus dem „DVB-T2-Modellversuch Norddeutschland“, nahezu ideale Rauschleistungsschätzung

wand nötig ist als für die Kreuzkorrelationsverfahren.

Bild 3 zeigt die Ergebnisse für Testfall 2. Dabei fällt auf, dass insbesondere die Energiedetektion deutlich von der Rauschleistungsschätzung abhängig ist. Schon bei einer recht geringen Abweichung der Schätzung um 1 dB zeigt sich der Effekt der SNR-Wall, welcher die Energiedetektion fast unbrauchbar macht. Die anderen Verfahren

werden mäßig (z. B. Kreuzkorrelations-Verfahren, Sliding Window) oder nicht (Momente zweiter Ordnung, Autokorrelations-basiert) von der Schätzung der Rauschleistung beeinflusst. Durch die fehlerhafte Schätzung der Rauschleistung sind die Grenzwerte nicht optimal, so dass die Kurven nicht gegen die ursprünglich gewünschte Fehlalarmrate konvergieren.

Bild 4 zeigt die Leistungsfähigkeit der Verfahren für Testfall 3. Im Vergleich zu Bild 2 fällt auf, dass insbesondere die Kreuzkorrelations-Verfahren für eine zuverlässige Signalerkennung ein um etwa 2 dB größeres S/N benötigen und damit deutlich von den Ausbreitungsbedingungen des Signals abhängig sind. Die Kurven der Guard-Intervall-basierten Verfahren sind im Vergleich zu den im AWGN-Kanal ermittelten Ergebnissen um etwa 0,5 dB und damit nur in geringem Maße verschlechtert. Die vom Übertragungsstandard unabhängige Energiedetektion zeigt dagegen eine unveränderte Empfindlichkeit.

Die in den Simulationen gewählten Übertragungsparameter entsprechen realistischen Annahmen zu einer möglichen Einführung von DVB-T2 in Deutschland. Sie erwiesen sich als vorteilhaft für Spectrum Sensing (großer FFT-Modus, lange Guard-Intervalle, große Pilotträgerdichte), bei anderen Signalparametern sind Abweichungen in der Leistungsfähigkeit der Verfahren zu erwarten. Im Hinblick auf den Rechenaufwand und die getesteten Störeinflüsse hat sich gezeigt, dass die Verfahren zur Erkennung der Guard-Intervalle einen guten Kompromiss für die Anwendung in White Space-Geräten bieten.

6. Zusammenfassung

Eine effektive Möglichkeit, White Spaces zu identifizieren, ist die Verwendung von Spectrum Sensing. Sensing-Verfahren für den neuesten Übertragungsstandard des terrestrischen Fernsehens, DVB-T2, wurden vorgestellt und hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit untersucht. Einige dieser Verfahren, die auf die physikalische Übertragungsschicht des Standards zugreifen, wurden neu entwickelt, andere mussten entsprechend angepasst werden.

Da neben der Empfindlichkeit der Algorithmen vor allem Aspekte der Rechenkomplexität und der Robustheit unter realen Empfangsbedingungen eine wichtige Rolle spielen, geht kein Verfahren als klarer Sieger aus der Untersuchung hervor. Je nach Anwendungsfall können unterschiedliche Verfahren besser geeignet sein. So kann eine höhere Empfindlichkeit häufig auf Kosten eines höheren Rechenaufwands erkaufte werden. Einen guten Kompromiss zwischen Empfindlichkeit und Rechenaufwand stellen die Verfahren zur Erkennung der Guard-Intervalle dar.

Die Leistungsfähigkeit einiger Algorithmen weist eine starke Abhängigkeit von systembedingten Eigenschaften wie etwa der Rauschleistungsschätzung auf, was ebenfalls zu berücksichtigen ist. Die vorgestellten Ergebnisse können bei der Auswahl eines Sensing-Verfahrens als Entscheidungshilfe dienen.

Danksagung

Die Autoren danken ihren Kollegen des Instituts für Nachrichtentechnik der Technischen Universität Braunschweig, insbesondere Prof. Dr.-Ing. Ulrich Reimers, für die hilfreichen Kommentare und Anmerkungen.

7. Literatur

- [1] Mitola III, J.: Cognitive Radio: An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio. Dissertation, Royal Institute of Technology (KTH), Kista, 2000.
- [2] Digital Video Broadcasting (DVB): Frame structure, channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2). ETSI EN 302 755, 2012.
- [3] Qi, J.; Neumann, P.; Reimers, U.: Dynamic Broadcast. 14. ITG-Fachtagung für Elektronische Medien, 2011, pp. 1–6.
- [4] Palka, P.; Reimers, U.: Allocation of Dynamic TV White Spaces in a Dynamic Broadcast System. 2012 IEEE International Conference on Consumer Electronics - Berlin, 2012, pp. 123–130.
- [5] Tandra, R.; Mishra, S. M.; Sahai, A.: What is a Spectrum Hole and What Does it Take to Recognize One? Proceedings of the IEEE, vol. 97, no. 5, pp. 824–848, 2009.
- [6] Ilsen, S.: Implementierung von Sensing-Verfahren für DVB-T2. Masterarbeit, Technische Universität Braunschweig, 2012.
- [7] Danev, D.: On Signal Detection Techniques for the DVB-T Standard. 4th International Symposium on Communications, Control and Signal Processing, 2010, pp. 1–5.
- [8] Tandra, R.; Sahai, A.: Fundamental limits on detection in low SNR under noise uncertainty. *International Conference on Wireless Networks, Communications and Mobile Computing*, 2005, pp. 464–469.
- [9] Axell, E.; Larsson, E.: Optimal and Near-Optimal Spectrum Sensing of OFDM Signals in AWGN Channels. 2nd International Workshop on Cognitive Information Processing, 2010, pp. 128–133.
- [10] Digital Video Broadcasting (DVB): Implementation guidelines for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2). ETSI TS 102 831, V1.2.1, 2012.
- [11] Chen, H.-S.; Gao, W.; Daut, D.: Spectrum Sensing for OFDM Systems Employing Pilot Tones and Application to DVB-T OFDM. IEEE International Conference on Communications, 2008, pp. 3421–3426.
- [12] Gaddam, V.; Ghosh, M.: Robust Sensing of DVB-T Signals. IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2010, pp. 1–8.
- [13] Projektat DVB-T2 Modellversuch Norddeutschland (Hrsg.): *Terrestrik der Zukunft: Zukunft der Terrestrik*. Shaker Verlag, 2012.