

Diss. ETH Nr. 9380

P. Leuthold

19.06.91

**Zur binären Nachrichtenübertragung auf Kanälen
mit rein zeitselektivem, langsamem Rayleigh-Fading**

**ABHANDLUNG
zur Erlangung des Titels
DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN
der
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE
ZÜRICH**

**vorgelegt von
HANSPETER WIDMER
dipl. El.-Ing. ETH
geboren am 2. Dezember 1955
von Zofingen (AG)**

**Angenommen auf Antrag von
Prof. Dr. P. Leuthold, Referent
Prof. Dr. F. Eggimann, Korreferent**

Zürich 1991

Abstract

This thesis work mainly deals with the energy efficient binary communication on the wellknown AWGN-channel with purely time-selective Rayleigh fading (nondispersive fading channel). The applied Rayleigh fading model includes a time-variant channel gain and phase (complex channel gain). The complex channel gain process can be described by two independent narrow-band gaussian random processes each with a gaussian shaped (Doppler) spectrum. The coherence time of the assumed fading channel which is indirectly defined by the Doppler spread parameter σ_s is much larger than the symbol period. Several authors attribute a memory to this type of random channel.

Designers of communication systems for fading-channels normally choose differentially coherent or noncoherent modulation schemes such as 2-DPSK or 2-NC-FSK respectively to cope with the randomly time-varying phase. However the inherent channel memory cannot be exploited sufficiently with these conventional schemes. A much higher energy efficiency is achieved with partially coherent detection of 2-PSK, a method where the receiver measures the actual complex channel gain (channel state estimation) by means of the noisy receiving signal itself. This fact is chiefly true when in addition efficient coding schemes are applied and the resulting signal-to-noise ratio per channel symbol is very low.

In the theoretical part of this work several models of discrete-time channels consisting of a modulator, a wave form channel and a demodulator are compared by means of the minimum required signal-to-noise ratio per information bit (E_b/N_0) to achieve Shannon channel capacity. For all discrete-time channel models with memory a random channel use is assumed, accomplished by an unknown pseudo random interleaving algorithm with infinite depth, so that an observer of the channel output would not notice any memory. This corresponds to the practical situation where normally an interleaving scheme is employed to transmit long code words over channels with memory. However this method has no negative influence on the channel state estimation which is established before deinterleaving, so that the full channel memory can be exploited.

Several authors pointed out that optimal channel state estimation and decoding strictly are not separable problems. Optimum receivers for channels with complex fading distortion generally are unrealisable. In practice normally suboptimum systems with a separated channel state estimation and therefore significantly less complexity are employed. In this case the estimator supplies the demodulator with phase information (phase synchronisation) and the decoder with confidence information.

Two discrete-time channel models, each including a scheme of this suboptimum class are investigated in respect to capacity. One of them is the well known transmitted reference system, that measures the complex channel gain by means of a special reference signal. The latter is transmitted additionally to the data bearing signal and requires a certain portion of the total transmitting power. The power division ratio is optimized for maximum capacity.

The results of the theoretical investigation of a transmitted reference 2-PSK system and a 2-DPSK-system show a gain in $(E_b/N_0)_{\min}$ of the former over the latter of 1 to 5 dB depending on the received signal-to-noise spectral density ratio $\gamma = P/(\sigma_s N_0)$, assuming an optimum code rate in the range $R > 0.1$ and a soft decision demodulation for both systems.

Furthermore capacity limits for the binary communication on the purely time-selective Rayleigh fading channel with infinitely large bandwidth are investigated. For decreasing ratio γ , the results show a rapidly increasing ratio $(E_b/N_0)_{\min}$ if the peak power of the channel input is limited. However for a limited average power reliable communication is bounded by the well known Shannon limit ($E_b/N_0 = \ln 2$).

At the end of this report an experimental investigation based on a simulation system for low data rate transmission on the Rayleigh fading channel employing a simple block code ($R = 0.11$) with interleaving and correlation decoding is described. The measured signal-to-noise-ratios E_b/N_0 to achieve a post decoding bit error probability $P_b = 10^{-2}$ show that the "relative" gains promised by information theory are not far away from reality.

Übersicht

Hauptgegenstand der vorliegenden Untersuchung bildet die Energie-effiziente, binäre Übertragung codierter Nachrichten auf dem AWGN-Kanal mit rein zeitselektivem Rayleigh-Fading (nichtdispersiver Fading-Kanal). Das verwendete Rayleigh-Fading-Modell beinhaltet dabei eine im Vergleich zur Symbolrate langsam stochastisch variierende Kanaldämpfung und -phase (komplexe Kanaldämpfung). Die Kohärenzzeit eines solchen Kanales ist wesentlich länger als die Symboldauer. In der Literatur spricht man dann oft von einem Kanal mit Gedächtnis.

Üblicherweise werden für die Übermittlung binärer Daten auf Fading-Kanälen differentiell-kohärente oder nichtkohärente Übertragungsmethoden wie 2-DPSK bzw. 2-NC-FSK sowie eine Codespreizung (interleaving) eingesetzt. Mit diesen konventionellen Übertragungsverfahren bleibt aber das inhärente Gedächtnis des Fading-Kanales praktisch ungenutzt. Wesentlich Energie-effizientere Systeme erhält man mit partiell-kohärenter 2-PSK, indem empfangsseitig eine Schätzung der komplexen Kanaldämpfung (Kanalzustandsschätzung) aus dem verrauschten Empfangssignal selbst durchgeführt wird. Dies gilt im besonderen in den speziellen Anwendungsfällen, wo man eine Codierung mit relativ niedriger Rate und hohem Gewinn einsetzt, und damit ein geringes Signal-Geräuschverhältnis pro Kanalsymbol resultiert.

Die in der vorliegenden Arbeit entwickelte Theorie erlaubt eine quantitative Aussage anhand eines Kapazitätsvergleichs verschiedener Modelle von zeitdiskreten Übertragungskanälen, welche nebst dem eigentlichen physikalischen Kanal (waveform channel) ein spezielles binäres Modulations- und Demodulationssystem miteinbeziehen. Sind diese zeitdiskreten Kanäle gedächtnisbehaftet, so wird jeweils am Kanaleingang eine Spreizung (interleaving) und am Kanalausgang eine Rückspreizung (deinterleaving) angenommen. Dies entspricht der praktischen Situation, wo man für die Übertragung langer Codewörter auf zeitvarianten Kanälen mit Vorteil eine Spreizung einsetzt. Der sogenannte gespreizte zeitdiskrete Kanal erscheint nun gegen aussen als gedächtnisfrei, jedoch nicht in bezug zur Kanalzustandsschätzung, welche vor der Rückspreizung erfolgt.

Aus der Literatur ist es aber bekannt, dass sich das Problem der optimalen Schätzung der komplexen Dämpfung strenggenommen nicht vom Decodierungsproblem trennen lässt. Die Realisation eines optimalen Empfängers für den Kanal mit zeitvarianter komplexer Dämpfung scheidet jedoch am erforderlichen gewaltigen Rechenaufwand. In der Praxis werden deshalb meistens suboptimale Systeme mit einer von der Decodierung völlig losgelösten Kanalzustandsschätzung und damit niedrigerer Komplexität eingesetzt.

Zwei Kanalmodelle, welche ein Verfahren dieser suboptimalen Klasse mit einschliessen, werden bezüglich ihrer Kapazität untersucht. Ein Beispiel ist das wohlbekannte

"Transmitted Reference"-System, welches die komplexe Kanaldämpfung anhand eines nichtinformationstragenden Referenzsignals schätzt. Letzteres benötigt einen gewissen Teil der totalen Sendeleistung. Das Leistungsteilungsverhältnis wird jeweils optimiert, so dass eine maximale Kapazität resultiert.

Interessant ist der Vergleich des theoretisch minimal notwendigen Signal-Geräusch-Verhältnisses $(E_b/N_0)_{\min}$ pro Informationsbit. Die Resultate zeigen einen vom Verhältnis $P/(\sigma_s N_0)$ (P : Nutzsignalleistung, σ_s : Doppler-Verbreiterung oder reziproke Fading-Rate) abhängigen Gewinn zwischen 1 und 5 dB gegenüber einem DPSK-System mit "soft decision"-Demodulation und optimaler Coderate ($R \cong 0,25$). Voraussetzung für das "Transmitted Reference"-PSK-System ist allerdings eine niedrige Coderate ($R < 0,1$) sowie eine optimale Energierteilung zwischen Daten- und Referenzsignal.

Ferner werden Kapazitätsschranken für die binäre Nachrichtenübertragung auf dem rein zeitselektiven Rayleigh-Fading-Kanal mit beliebig expandierbarer Bandbreite verglichen. Sie zeigen mit abnehmendem Verhältnis $P/(\sigma_s N_0)$ ein rasches Anwachsen des Störabstandes $10 \log(E_b/N_0)_{\min}$, falls die Spitzenleistung des Senders begrenzt ist. Setzt man jedoch eine begrenzte Durchschnittsleistung voraus, so gilt bekanntlich auch für den Rayleigh-Fading-Kanal die Shannon-Grenze des konstanten AWGN-Kanales ($10 \log(E_b/N_0)_{\min} = -1,6\text{dB}$).

Inwieweit sich die Vorhersagen der Informationstheorie in der Praxis widerspiegeln, zeigt eine am Schluss dieses Berichtes beschriebene experimentelle Untersuchung exemplarisch für einige der theoretisch behandelten Modelle. Hierzu wird eine einfach realisierbare Blockcodierung zusammen mit einer optimalen Korrelationsdecodierung verwendet.