

## 通信品質を考慮したデジタル無線通信システムの 低消費エネルギー化の検討

徳永, 将之  
九州大学大学院システム情報科学府

辻本, 泰造  
福岡県知的クラスター研究所

安浦, 寛人  
九州大学大学院システム情報科学研究院

室山, 真徳  
九州大学システムLSI 研究センター

<https://hdl.handle.net/2324/6350>

---

出版情報 : 電子情報通信学会技術研究報告. 106 (386), 2006-11. 電子情報通信学会  
バージョン :  
権利関係 :

# 通信品質を考慮した デジタル無線通信システムの低消費エネルギー化の検討

徳永 将之<sup>†</sup> 辻本 泰造<sup>††</sup> 安浦 寛人<sup>†††</sup> 室山 真徳<sup>††††</sup>

<sup>†</sup>九州大学 大学院システム情報科学府, 〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 番地

<sup>††</sup>福岡県知的クラスター研究所, 〒814-0001 福岡市早良区百道浜 3-8-33

福岡システム LSI 総合開発センター 3F

<sup>†††</sup>九州大学大学院システム情報科学府, 〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 番地

<sup>††††</sup>九州大学システム LSI 研究センター, 〒814-0001 福岡市早良区百道浜 3-8-33

福岡システム LSI 総合開発センター 3F

E-mail: †{tokunaga,yasuura}@c.csce.kyushu-u.ac.jp, ††taizo@fleets.jp, †††muroyama@slrc.kyushu-u.ac.jp

あらまし デジタル無線通信システムの低消費エネルギー化のための手法として、送信信号の信号電力を 変化させるものがある。これは消費エネルギーとデータの誤り率とのトレード オフを考慮した手法である。信号電力を 変化させることにより送信機の低消費エネルギー化は行えるが、受信機の消費エネルギーは変化しない。本稿では信号電力に加え受信機の演算精度を考慮することにより送受信機両方の消費エネルギー削減を行う。そのための通信路解析を行い、受信機における消費エネルギーは最大 89%、システム全体を考慮した場合最大 69%の消費エネルギーが削減可能であることを示した。

キーワード デジタル無線通信, 低消費エネルギー, 演算精度

## A Study on Energy Reduction in Quality-driven Digital Wireless Communication Systems

Masayuki TOKUNAGA<sup>†</sup>, Taizo TSUJIMOTO<sup>††</sup>, Hiroto YASUURA<sup>†††</sup>, and Masanori MUROYAMA<sup>††††</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University, 744 Motooka Nishi-ku Fukuoka 819-0395 JAPAN

<sup>††</sup> Fukuoka Laboratory for Emerging and Enabling Technology of SoC, 3rd Floor Institute of System LSI Design Industry, Fukuoka 3-8-33 Momochihama, Sawara-ku, Fukuoka 814-0001 JAPAN

<sup>†††</sup> Faculty of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University, 744 Motooka Nishi-ku Fukuoka 819-0395 JAPAN

<sup>††††</sup> System LSI Research Center, Kyushu University, 3rd Floor Institute of System LSI Design Industry, Fukuoka 3-8-33 Momochihama, Sawara-ku, Fukuoka 814-0001 JAPAN

E-mail: †{tokunaga,yasuura}@c.csce.kyushu-u.ac.jp, ††taizo@fleets.jp, †††muroyama@slrc.kyushu-u.ac.jp

**Abstract** One major method for reduction of energy consumption in digital wireless communication systems is to control transmission signal power. This method consider trade offs between signal power and data error rate. It can be achieved by control signal power to energy reduction in transmitter, but not in receiver. So in addition to signal power control in transmitter, precision control in receiver can reduce energy consumption in both transmitter and receiver. In this paper, channel characterization and analysys make clear the possibbility of 89 % energy reduction in receiver and 69 % in communication system.

**Key words** digital wireless communication, low energy consumption, precision of operation

## 1. はじめに

近年、デジタル無線通信の普及が進み、携帯電話や地上デジタル放送等、デジタル無線通信技術を利用した機器も多岐にわたる。そうした機器の多くは携帯型のものである。携帯機器の多くはバッテリーを動力源としており、バッテリーの容量制限が存在する。そのため、携帯型デジタル無線通信端末には低消費エネルギーであることが求められている。

デジタル無線通信の低消費エネルギー化のために用いられる手段の一つに送信信号電力を変化させるものがある。通常より弱い電力の信号を用いて送受信を行うため、送信端末における消費エネルギーを削減することができる。しかし、信号が弱まるため通信距離が短くなり、受信データの誤り率も増加する。無線 LAN 等では誤り率の増加によりデータの再送が起こり、結果通信全体での消費エネルギーが増加することがある。また、地上デジタル放送等では再送は発生しないが、データの復号ができない場合復号された音声や画像に乱れが生じる。そのため、通信の形態、通信環境によって適切な信号電力を選択することで通信品質を守った範囲で低消費エネルギー化を行う。

上記手法は送信側の信号電力を変化させることにより低消費エネルギー化を行うため、送信端末の消費エネルギーを削減することは可能であるが受信側の消費エネルギーを削減することはできない。また、受信端末が一つである場合はその端末との通信が正しく行うことのできるよう送信電力を決定すればよいが、受信端末が複数ある場合最も通信環境の悪い受信端末に合わせて送信電力を決定しなければならない。そのため他の端末に対しては過剰な信号電力で送信されている場合もあると考えられる。

本稿では受信側端末について通信環境に応じて消費エネルギーを変化させる手法について考える。そのためのパラメタとして受信処理における演算精度を用いる。受信処理では、通常誤差が発生する。これは増幅器における雑音やデジタル回路の量子化雑音等によるものである。受信処理を高い演算精度を行う場合、演算精度の低い場合に比べてより多くの消費エネルギーが発生する。演算精度が低い場合、消費エネルギーは低いが雑音の増加により誤り率の上昇が発生する。通信環境によって演算精度を適切に設定することにより低消費エネルギー化を目指す。

本稿では演算精度を変化させることにより誤り率がどのように変化するかを調査し、低消費エネルギー化の可能性についての考察を行う。本稿の構成は以下の通りである。まず第 2. 章で関連研究の紹介を行う。第 3. 章で通信路、消費エネルギーについてもモデルを提示し、4. 章において受信機の演算精度を変化させることによる低消費エネルギー化についての説明を行う。5. 章において有効性を確認するための実験を行い、6. 章で結果に対しての考察を行い 7. 章で本稿をまとめ、今後の課題を述べる。

## 2. 関連研究

送信側において送信電力を変化し、低消費エネルギー化を行

う研究に [2] がある。送信信号電力とパケットサイズを操作し、通信速度と消費エネルギーのトレードオフを考慮した最適点を求めている。この操作により、送信機の消費エネルギーを削減することができているが、受信機の消費エネルギーについては考慮されていない。

受信機での演算精度を決定し低消費エネルギー化を行うものとして [3] がある。設計段階においてデジタル回路の演算に用いるビット幅を削減し低消費エネルギー化を行う。ビット幅の削減により演算精度が低下するが、回路規模の削減や、トランジスタのスイッチング回数の削減により低消費エネルギー化することができる。しかし設計時に演算精度を決定するため、通信環境の悪いときを想定し演算精度を決定しなければならない。

本手法では通信環境に合わせて送信機の信号電力、受信機の演算精度を変化させ、低消費エネルギー化を目指す。

本研究は [1] での研究を基礎としている。[1] は実効スループットを通信品質とし、IEEE802.11a での通信においてパケット長、信号電力、変調方式、受信演算精度を操作し低消費エネルギー化を行うものである。本稿では通信品質として受信信号の誤り率を対象としている。また [1] では端末間の距離を一定とし解析を行っている。しかし、実際の通信では端末間の距離は重要なパラメタであり、その値によって通信路の環境は大きく変化する。端末間の距離が非常に大きい場合は強い送信信号が必要になり、受信機の演算精度も高いものが要求されると考えられる。逆に近距離では信号電力、演算精度ともに必要な値は小さい。本稿では端末間の距離をパラメタとして加え、距離の変化による通信品質への影響、および低消費エネルギーとなる演算精度の決定への影響を調査した。

## 3. 準備

### 3.1 通信路モデル

本稿で取り扱う通信路モデルは以下の通りである。なお、本稿で取り扱う通信は MAC (Medium Access Control) 層以下のものである。

- 物理層の処理は IEEE802.11a のものを考える
- システムは 1 つの送信機、一つの受信機により構成される
- 通信路においては白色雑音を加えられる
- マルチパスの影響は考えない
- 変調方式は M 値 QAM を用いる

M 値 QAM (Quadrature Amplitude Modulation) とは、搬送波の位相と振幅を変化することで情報を伝送する方式である。M には通常 16, 64 などが当てはまる。搬送波を複素信号  $H(t)$  とした場合、 $H(t)$  は

$$H(t) = I \cos \omega t + jQ \sin \omega t \quad (1)$$

と表すことができるここで  $j$  は虚数を表し、 $\omega$  は搬送波の各周波数である。(I,Q) の値により伝送する情報を表す。16QAM (M=16) によるマッピングの様子を図 1 に示す。64QAM では 1 シンボルあたり 6 ビットの情報伝送を行う。

以上のような通信路における誤り率を考える。本稿では誤り

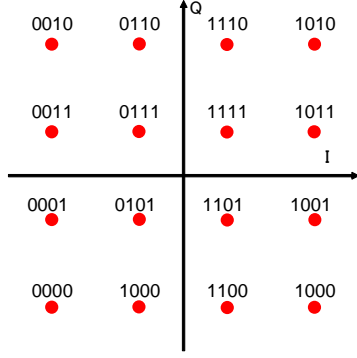


図 1 16QAM によるマッピング

率の指標として SER (Symbol Error Rate) を用いる．これは変調信号が誤って復調される確率を表したものである．SER は以下の式で表される．

$$SER = 1 - (1 - P_{\sqrt{M}})^2 \quad (2)$$

$$P_{\sqrt{M}} = 2\left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right)Q\left(\sqrt{\frac{3}{M-1} \frac{rsig}{N}}\right) \quad (3)$$

$$Q(x) = \int_x^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2}} dy \quad (4)$$

$$rsig = \begin{cases} sig * g_{tx} g_{rx} \left(\frac{c}{f_c 4\pi}\right) & d \leq 1[m] \\ sig * g_{tx} g_{rx} \left(\frac{c}{f_c 4\pi}\right) \frac{1}{d^\gamma} & d > 1[m] \end{cases} \quad (5)$$

である．変数はそれぞれ

- $sig$  : 送信信号電力 [W]
- $N$  : 雑音電力 [W]
- $g_{tx}$  : 送信機アンテナゲイン
- $g_{rx}$  : 受信機アンテナゲイン
- $c$  : 搬送波速度 [m/s]
- $f_c$  : 搬送波周波数 [Hz]
- $d$  : 送受信機間距離 [m]
- $\gamma$  : 係数

を表す．本稿では  $g_{tx} = g_{rx} = 1, \gamma = 3.5$  とする．ここで (3) 式における雑音成分  $N$  を通信路における雑音電力  $N_{ch}$ , 演算誤差  $N_{pre}$  の和と考えると (3) 式は次のように書き換えられる．

$$P_{\sqrt{M}} = 2\left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right)Q\left(\sqrt{\frac{3}{M-1} \frac{rsig}{N_{ch} + N_{pre}}}\right) \quad (6)$$

### 3.2 消費エネルギーモデル

通信におけるシステム全体の消費エネルギー  $E$  は，送信機の消費エネルギー  $E_{tx}$ , 受信機の消費エネルギー  $E_{rx}$  の合計によって表される．

$$E = E_{tx} + E_{rx} \quad (7)$$

$$E_{tx} = \int_0^T P_{rx}(sig) dt \quad (8)$$

$$E_{rx} = \int_0^T P_{rx}(pre) dt \quad (9)$$

ここで

- $T$  : 通信時間 [s]

- $P_{tx}(sig), P_{rx}(pre)$  : 送信機, 受信機消費電力 [W]
- $pre$  : 受信機演算精度 [dB]

である．また,  $pre$  と  $N_{pre}$  に関して

$$N_{pre} = \frac{1}{10^{\frac{pre}{10}}} \quad (10)$$

のような関係が成り立つ．上記のように送信機の消費エネルギーは送信信号電力に, 受信機の消費エネルギーは演算精度によって変化する．それぞれの消費電力については, 本稿では以下のような線形モデルを用いる．

$$P_{tx}(sig) = a_t * sig + b_t \quad (11)$$

$$P_{rx}(pre) = a_r * pre + b_r \quad (12)$$

$a_t, a_r, b_t, b_r$  は定数である．上式から高い精度による演算にはより多くの消費エネルギーが必要であることがわかる．また, 送信信号電力  $sig$ , 受信機演算精度  $pre$  が高い送信システムでは SER は小さくなるが, 消費エネルギーが増加する．逆に  $sig, pre$  が小さい場合消費エネルギーは削減できるが SER が増加し, 正しく通信を行うことができなくなる可能性がある．

## 4. 受信側演算精度の操作による低消費エネルギー化

### 4.1 基本方針

送信機における信号電力, 受信機における演算精度を操作することにより低消費エネルギー化を行う．

第 2. 章において述べたように, 本手法の特徴として

- 送信機の送信信号電力
- 受信機の演算精度

の両方を通信環境に応じて操作し低消費エネルギー化を行う, という点が挙げられる．

(7)(8)(9)(11)(12) 式より, システムの消費エネルギーは送信機の信号電力  $sig$ , 受信機の演算精度  $pre$  に依存する．これらのパラメータ変化させることで消費エネルギーを削減することができるが, 通信の質が悪化し, SER が増大する．そのため, SER が悪化しすぎない範囲で  $sig, pre$  を決定し, 消費エネルギーを削減する． $sig, pre$  の決定方針として以下のパターンが考えられる．

- (1) 送信機消費エネルギーの削減
- (2) 受信機消費エネルギーの削減
- (3) 送信機と受信機の消費エネルギーの合計の削減

(1) は前述の通り [2] において対象とされている．(2) はデジタル放送等, 送信電力が一定である通信システムにおいて有効であると考えられる．(3) では通信システム全体の消費エネルギー削減を目標としている．センサネットワークにおける通信等, 送受信機両方の消費エネルギーを削減したい場合に有効であると考えられる．本稿では (2)(3) の問題について取り組む．

### 4.2 低消費エネルギー化問題

ある変調方式を用いて通信を行うとき, 通信における SER は  $sig, pre, N_{ch}, d$  によって, 消費エネルギーは  $sig, pre$  によって決定される．このとき, 本稿で解くべき低消費エネルギー化問題を以下のように定義する．

$$\begin{aligned}
& \exists sig, d, m \\
& obj : \min E \\
& sub.to : \\
& SER \leq SER_{th} \\
& pre_{min} \leq pre \leq pre_{max}
\end{aligned} \tag{13}$$

信号電力, 端末間距離, 送受信変調方式が与えられたとき, SERがある一定値を超えない範囲で消費エネルギーが最小になるように受信機の演算精度を決定する. ただし, 演算精度には上限, 下限が存在する.

## 5. 有効性確認実験

本章では具体的数値を与え (13) 式の計算を行い, 受信機による演算精度の変化によりどの程度の消費エネルギーが削減できるかの検討を行う.

### 5.1 目的

本実験では以下の2項目についての確認を行う.

(1) 受信機演算精度の操作による受信機消費エネルギー削減効果

(2) 送信機信号電力, 受信機演算精度の操作によるシステム消費エネルギー削減効果

(1) に関しては実験1, (2) に関しては実験2においてそれぞれ確認する.

### 5.2 実験手順

計算手順は以下の通りである.

(1) 信号電力  $sig$ , 端末間距離  $d$ , 許容できるシンボル誤り率  $SER_{th}$  に適切な値を与える

(2) それらの値を (2) に代入し,  $SER = SER_{th}$  となる受信機演算精度  $pre$  を求める. (2) 式より  $SER$  は  $pre$  に対し単調減少であり, 信号電力が一定である場合, 消費エネルギーは  $pre$  に対し単調増加であるため, 求めた  $pre$  が (13) 式の解となる

それぞれのパラメタの値は

- $M = 64$
- $a_t = 2$
- $b_t = 1$
- $a_r = 1$
- $b_r = 1$
- $SER_{th} = 0.001$
- $pre_{max} = 70$

を用いている.  $N_{ch}$  は SNR (Signal to Noise Ratio, 信号雑音電力比) 35[dB] 相当の値を用いた. 信号電力  $sig$  は, 基準となる信号との比で表す. なお, 全ての演算は MATLAB [5] を用いた.

### 5.3 結果

#### 5.3.1 実験1

図2に結果を示す. 横軸に端末間距離, 縦軸に必要な最低限の演算精度を示す. 図からわかるように距離によって必要となる演算精度が大きく異なっていることがわかる.

演算精度を変化させない場合, 通信環境がよくない場合にお

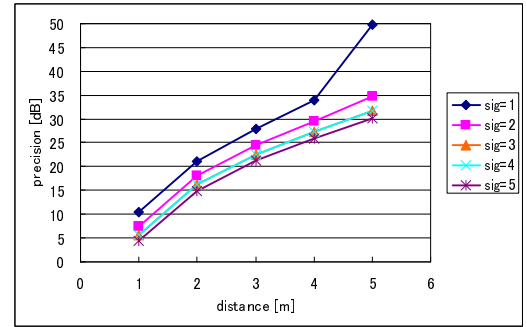


図2 必要演算精度

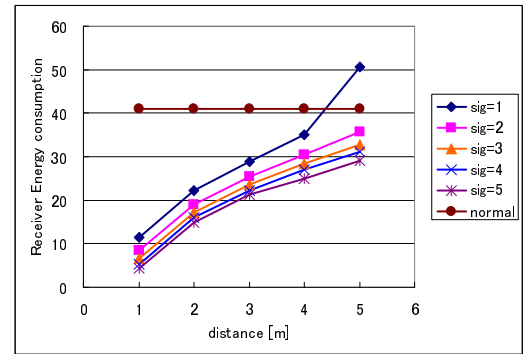


図3 受信機消費消費エネルギー比較

いても正しく受信できるよう, 演算精度はあらかじめ高めに設定しておく必要がある. 40[dB] の演算精度で設計を行った場合, 図2の通信環境下では  $sig = 1, d = 5$  の場合以外においては正しく送受信可能である. しかし, より端末間距離が近い場合や, 信号電力が大きい場合の通信においては必要以上の演算精度を持つことになり, 演算精度を変化させる場合に比べて消費エネルギーが大きくなる.

同じ条件下の通信での受信機の消費エネルギーを図3に示す. 図中の normal は演算精度 40[dB] で固定した場合の消費エネルギーである. 演算精度を変化させることにより, 消費エネルギーを削減できることがわかる. 端末間距離が大きいほどより効果的に削減できている. この場合, 受信機において最大 89% の消費エネルギーが削減可能である.

#### 5.3.2 実験2

$sig, pre$  の2つのパラメタを操作し, 消費エネルギーを削減する. 図5は  $SER = SER_{th}$  となる  $sig, pre$  の関係を, 端末間の距離ごとに求めたものである.  $sig$  が大きくなると必要な  $pre$  は小さくなり, 逆に小さい  $sig$  に対しては大きな  $pre$  が必要である.

消費エネルギーは図5のようになる. 図中の normal は  $pre = 40[dB]$  で固定した場合の消費エネルギーである. 演算精度を固定した場合に比べて距離が近い場合に大きく消費エネルギーが削減できていることがわかる. 最大の消費エネルギー削減率は最大 69% であった.

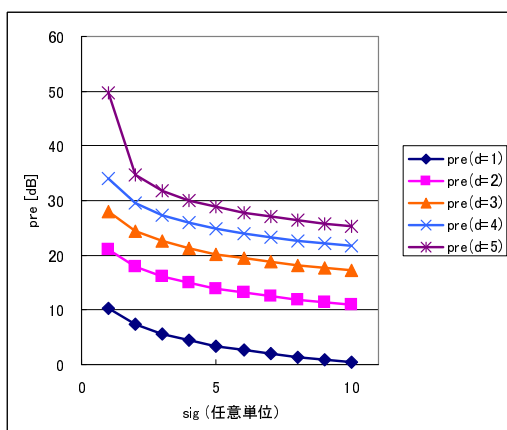


図 4  $SER = SER_{th}$  となる信号電力，演算精度

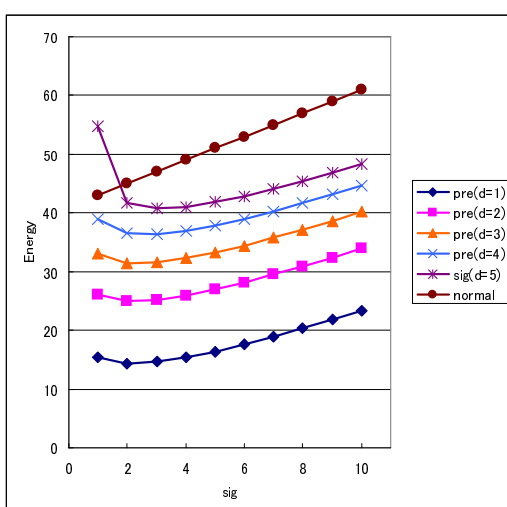


図 5 信号電力，演算精度を変化させた場合のシステムの消費エネルギー

## 6. 考 察

本手法を実際の通信に低起用する場合，考えなければならないことが複数存在する．それらの事柄について前章で行った実験結果を元に考察を行う．

### 6.1 動的な演算精度制御

前章までに示したように，受信機側で必要となる演算精度は端末間の距離によって大きく異なる．そのため，監視カメラ等，設置後の各通信において端末間の距離が大きく変化しないアプリケーションでは演算精度を静的に決定する事ができる．しかし，携帯電話等の携帯端末での通信では通信ごとや，通信中に端末間の距離が変化するのが普通である．そうした場合において受信機の演算精度を変化させ低消費エネルギー化を行う場合動的に必要な演算精度を発見し，変化させなければならない．そのための方針について考える．

あらかじめ送信信号電力，端末間距離，通信路雑音がわかっている場合 (13) 式の演算により必要な演算精度を求めることは可能である．しかし，実際にはそれは困難である．送信信号電力をあらかじめ知るためには信号電力がどの程度であるのか

を伝えるための通信を行う必要があり，オーバーヘッドが発生する．端末間距離については通信中に知ることは困難であるため，外部から与えるという手段が考えられる．通信路雑音は正確な値を求めることが困難である．以上より (13) 式を厳密に解くことによる受信演算精度の決定は実際の動作においては困難である可能性がある．

実際に利用可能な手法として，通信中に現在の  $SER$  を計算し，その値と目標  $SER_{th}$  との差から演算精度を適応的に変化させる手法が考えられる．この手法では最適な演算精度に収束するまでに時間や，収束するかどうかが制御系の設計に依存する．

### 6.2 実装方式

本手法を適用する場合，受信側において演算精度が可変となるシステムの構築が必要となる．そのための受信回路の構成について考える．演算精度を変化させることの出来る箇所として，受信回路における

- RF 回路
- アナログ回路
- デジタル回路

が考えられる．RF 回路については，LNA(Low noise Amp) や mixer 回路等があるが，演算精度と消費エネルギーとの相関が強くないと考えられるため，本稿では除外する．

アナログ回路は AD 変換回路，アナログフィルタを含む．AD 変換回路における演算精度の指標として量子化ビット数がある．一般に AD 変換回路は量子化ビット数が大きいほど消費エネルギーも大きいため，量子化ビット数を変化させることで演算精度と消費エネルギーのトレードオフを考慮することが可能である．しかし，一つの AD 変換回路に対し量子化ビット数は一つである場合が普通であるため，複数 AD 変換回路を持たなければならない場合も考えられる．

デジタル回路は，デジタルフィルタや復調回路からなる．デジタル回路では数値を全て有限長ビットで表すため，表現のためのビット幅を変化させることで消費エネルギーを変化させることは比較的容易に実現可能である [6]．実装方式としては，該当部分のクロック供給を停止することによるトランジスタのスイッチング回数の削減や，電源の供給停止等が考えられる．

以上の方式を考慮し，演算精度の操作可能な受信システムの構築が必要である．

## 7. おわりに

本稿では受信端末の演算精度を変化させることによる低消費エネルギー化手法の提案し，その検討を行った．今後の方針としては

- ハードウェアへの実装方法の検討
- モデル式の高精度化
- 動的制御のためのアルゴリズムの考案

等を行う必要がある．

## 謝 辞

本研究は一部科学研究費補助金 (学術創成研究費 (2))(課題番

号:14GS0218) による.

#### 文 献

- [1] 樽見 幸祐, 室山 真徳, 安浦 寛人, “通信品質を考慮したデジタル無線通信システムの消費エネルギー解析” 第 19 回 回路とシステム 軽井沢ワークショップ, pp.223-228, 2006 年 4 月.
- [2] Jean-Pierre Ebert, Adam Wolisz, “Combined Tuning RF Power and Medium Access Control for WLANs”, In Journal of Mobile Networks & Applications (Monet), vol 6, no.5, pp. 417-426, Sep 2000.
- [3] Riten Gupta, “quantization strategies for low-power communications”, Doctor of Philosophy in The University of Michigan, 2001.
- [4] Stefan Mangold, Sunghyun Choi, Norbert Esseling, “An Error Model for Radio Transmissions of Wireless LANs at 5GHz”, In proc. of 10th Aachen Symposium on Signal Theory, pp.209-214, Aug 2001
- [5] MATLAB, mathworks  
<http://www.mathworks.com/>
- [6] 徳永 将之, 樽見 幸祐, 安浦 寛人, “デジタル無線通信用 FFT 回路のビット幅制御による低消費エネルギー化手法の検討”, 電子情報通信学会技術研究報告 ICD2005-68, 2005 年 8 月.