

符号多値変調方式と衝突回避プロトコルを融合したクロスレイヤアプローチによる WPAN のための省電力化方式

代表研究者	小 室 信 喜	千葉大学大学院融合科学研究科	助教
共同研究者	阪 田 史 郎	千葉大学大学院融合科学研究科	教授
共同研究者	関 屋 大 雄	千葉大学大学院融合科学研究科	准教授

1 はじめに

WPAN (Wireless Personal Area Network), センサネットワークやアドホックネットワークなどのワイヤレスネットワークが注目されている[1]. ワイヤレスネットワークでは, 送信電力制御に対して柔軟であること, 他局間干渉に対する耐性があることが望まれる. さらに, システムの簡易化, 高スループット・低遅延を達成できる方式が望まれている. これらの要求技術に対して, 設計自由度の高いスペクトル拡散 (Spread Spectrum: SS) に基礎をおく方式が研究されている[2]. 例えば, RFID (Radio Frequency Identification) や Bluetooth で利用されている FH (Frequency Hopping)方式, ZigBee など利用されている DS/SS (Direct Sequence / Spread Spectrum) 方式, UWB (Ultra Wide Band) 方式などが検討されている.

文献[3][4]では, 高スループットを達成する方法として, 他局間干渉抑圧技術が研究されている. また, DS/SS 方式のスループットを改善する方法として, 符号多値変調(以下, Code Shift Keying: CSK) を用いるランダムアクセス方式が研究されている[5]. WPAN などのワイヤレスネットワークに用いられるデバイスはほとんどがバッテリー駆動である. そのため, WPAN では, 低消費エネルギーを保ちつつ, 安定したスループット, 良好なスループットを達成することが望まれる. CSK を用いるランダムアクセス方式は, これらの問題を解決するのに適した方式であると期待できる.

[6]-[9]は低消費エネルギーを達成する方法として, 送信エネルギーの最適化に関する研究がされている. RTS/CTS (Request to Send / Clear to Send) を用いる IEEE 802.11 DCF (Distributed Coordination Function) は, RTS/CTS 制御パケットを最大出力で送信するため, 高い送信出力を必要とする. この問題を解決する方法として, RTS/CTS 制御パケットおよびデータパケットの送信出力を最適化することによって, 消費エネルギーを削減する方式が提案されている[6][7]. また, 文献[8]では, RTS/CTS 制御パケットを用いず, データのヘッダ部分を最大出力で送信し, データ部分を最適な出力で送信することによって, 送信エネルギーの低減する方式が提案されている. 文献[9]では, 消費エネルギー削減をする方法として, 多値変調方式のための送信電力制御方式が提案されている. しかし, 送信出力を抑えることがパケット誤りの増加, スループットの低下につながる. 結果として, 再送回数が増大し, 消費エネルギーの増大につながる恐れがある.

CSK ランダムアクセス方式は, DS/SS 方式に比べ, 同時送信しうる期間が短いいため, パケット誤り率および再送回数を低減できる. そのため, CSK ランダムアクセス方式は, パケット誤り率やスループットを劣化させることなく, 消費エネルギーを削減することが期待できる. CSK ランダムアクセス方式は同時送信しうる期間を短くすることによって, パケット誤り率を低減できるため, スリープ制御など消費エネルギーを削減する MAC プロトコルと組み合わせることによって, 劇的に消費エネルギーを削減することが期待できる.

本研究では, CSK を用いるランダムアクセス方式のエネルギー削減効果を定量的に明らかにし, 性能評価する. さらに, CSK ランダムアクセス方式と従来方式である DS/SS 方式の消費エネルギーを比較し, CSK ランダムアクセス方式の有効性を示す. また, CSK ランダムアクセス方式において最適な送信出力について検討する.

2 CSK を用いるランダムアクセス方式

2-1 CSK を用いる WPAN 構成

図 1 に構成図を示す. . . 各ユーザの通信可能距離は R [m] とする. 各ユーザにはユーザ識別のための疑似

雑音(PN)系列と全ユーザに共通の直交符号セット(M 種類の直交符号)が割り当てられている。

2-1 送信器

CSK で用いる系列として、各ユーザには長さ $L_s = M$ の直交符号 M 個が割り当てられている。各ユーザは、パケットの情報を $N_{bit} = \log_2 M$ ビットずつ切り出し、それに応じて直交符号セットの中から 1つの符号を選択し、PN 系列を乗算する。ここで、直交符号と PN 系列を乗算して構成される符号をシンボルと呼ぶ。1パケットあたりの情報ビット数を L_{p-info} とするとき、1つのパケットは $L_p = L_{p-info}/N_{bit}$ 個のシンボルから構成され、搬送波に乗せられ受信側に送信される。パケットは固定電力で送信される。

2-2 受信器

受信側では、まず受信信号を検波し、PN 系列を乗算することによってパケットを送信したユーザを推定する。次に、全ユーザが共通に持つ直交符号 $OS_j (j = 1, 2, \dots, M)$ との相関を取る。その値が最も大きくなる符号を、送信された直交符号であると判断し、データを復調する。

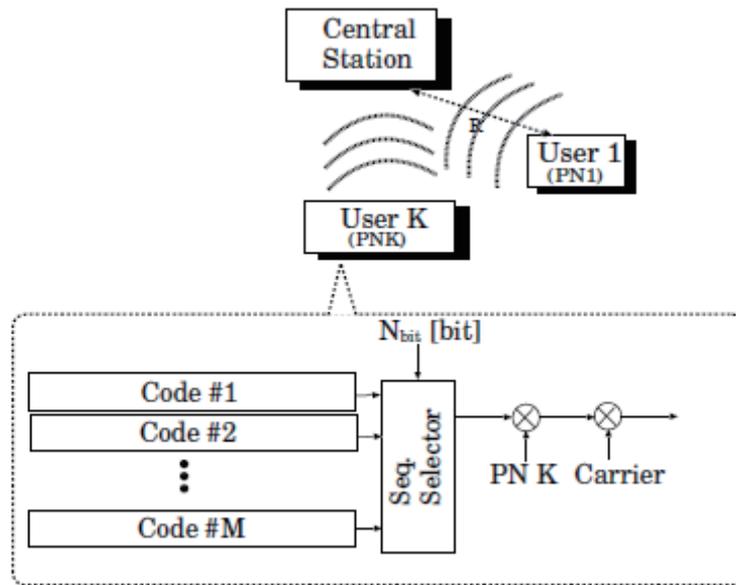


図 1 : CSK ランダムアクセス方式を用いる WPAN 構成図

3 性能解析

表 2 に本解析で用いる記号を示す。

表 2 : 解析で用いる記号の意味

λ	波長
α	$\lambda/4\pi$
R	送信局と受信局の距離
K	通信エリア内のユーザ数
E_T	送信信号エネルギー
I	他局間干渉エネルギー
$P_s(k)$	干渉ユーザ数が k であるときのパケット成功確率

3-1 解析仮定

以下を仮定し解析を行う。

- 各ユーザの送信電力は固定である。
- 各送信信号は無指向である。
- 直交符号のチップ幅と PN 系列のチップ幅は同じであるとし、チップごとにそのまま乗算する。

- 1パケット当たりの情報ビット数を L_{p-info} に固定する。
- 1パケット時間あたりに発生する平均パケット数を G とする。
- ネットワーク内のユーザ数を K とし、ネットワーク内に一様に分布する。

3-2 シンボル成功確率およびパケット成功確率[10]

他局間干渉局数が k であるとき、CSK のシンボル成功確率は次式であらわされる。

$$P_c(I) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) \left[\frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(-\frac{z + \sqrt{SNR(I)}}{\sqrt{2}}\right) \right]^{M-1} dz$$

ここで、 $\operatorname{erfc}(x)$ は誤差補関数であり、

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-t^2) dt,$$

$SNR(I)$ は干渉エネルギーが I であるとき、受信局における希望局からの信号エネルギー対雑音電力比であり、

$$SNR(I) = \left[\frac{I}{3L_s} + \frac{N_0}{2f(r)E_T} \right]^{-1}$$

$f(r)$ は、送信局と受信局間の距離が R であるときの、距離減衰関数であり、

$$f(r) = \left(\frac{\alpha}{r}\right)^\gamma,$$

で表わされる。 γ は距離減衰係数を表し、表3で示される値が用いられる[11]。

表3：距離減衰係数

環境	γ の値
市街地マクロセル	3.7-6.5
市街地マイクロセル	3.7-6.5
オフィスビル	2.0-6.0
工場	1.6-3.3
家屋	3.0

また、 N_0 は雑音電力であり、帯域幅 B 、使用環境の絶対温度を T とすると、

$$N_0 = T \times k \times B,$$

である。 k は、ボルツマン係数であり、 $k=1.38 \times 10^{-23}$ である。以上より、干渉エネルギーが I であり、1パケット当たりのシンボル数が L_p であるときのパケット成功確率 $P_s(k)$ は、

$$P_s(k) = \int_{R_{min}}^{R_{max}} \frac{2r}{(R_{max}^2 - R_{min}^2)} \left[\int_{(k-1)\alpha/R_{max}^2}^{(k-1)\alpha/R_{min}^2} P_{IF}(k-1, x) P_c \left\{ \left(\frac{\alpha}{r}\right)^\gamma \left(\frac{2x}{3L_s} + \frac{N_0}{N_{bit}E_{bT}}\right)^{-1} \right\}^{L_p} dx \right] dr$$

ここで、 $P_{IF}(x, k)$ は受信エネルギーが x であり、干渉ユーザ数が k であるときの、干渉エネルギーの確率密度関数を表し、

$$P_{IF}(k, x) = \underbrace{P_I(x) \otimes P_I(x) \otimes \dots \otimes P_I(x)}_{k \text{ times}}$$

である。受信エネルギーを x としたとき、1干渉ユーザの干渉エネルギーの確率密度関数 $P_I(x)$ は

$$\frac{\alpha E_T}{(R_{max}^2 - R_{min}^2)^2} \times \frac{1}{x}$$

である。

3-3 消費エネルギー

干渉ユーザ数が k であるとする。このとき、 $(d-1)$ 回目までの送信パケットが受信に失敗し、 d 回目の送信でパケットが受信に成功する確率 $P_D(D=d|k)$ は、

$$P_D(D = d|k) = [1 - P_S(k)]^{d-1} P_S(k).$$

となる。したがって、干渉ユーザ数が k のとき、着目パケットが受信に成功するまでに送信される回数 $D(k)$ は、再送回数の上限値を RET_LIMIT としたとき、

$$D(k) = \frac{\sum_{d=1}^{RET_LIMIT+1} d \cdot [1 - P_S(k)]^{d-1} P_S(k)}{\sum_{d=1}^{RET_LIMIT+1} [1 - P_S(k)]^{d-1} P_S(k)}.$$

で表われ、再送回数が RET_LIMIT を超えた場合、そのパケットは破棄される。以上より、1 シンボル当たりの送信エネルギーが E_s であるとき、1 パケット当たりの消費エネルギー $E_{consumption}$ は、

$$E_{consumption} = \frac{\sum_{k=0}^{K-1} K C_k D(k) \left(\frac{G}{K-1}\right)^k \left(1 - \frac{G}{K-1}\right)^{K-1-k}}{\sum_{k=0}^{K-1} K C_k \left(\frac{G}{K-1}\right)^k \left(1 - \frac{G}{K-1}\right)^{K-1-k}} E_s L_p.$$

となる。

4 性能評価

表 4 に性能評価する際に用いる諸元を示す。

表 4：諸元

L_{p-info}	1 パケット当たりのビット数 [bit]	1000
L_s	シンボル長 [chip]	32
M	CSK 符号数	32
$L_p (CSK)$	1 パケットを構成するシンボル数 [symbol]	200
$L_p (DS/SS)$	1 パケットを構成するシンボル数 [symbol]	1000
K	エリア内のユーザ数	15
E_p	1 パケット当たりの送信エネルギー [mJ]	4
γ	減衰係数	2.0
RET_LIMIT	最大再送回数	7

図 2 に、オフロードに対する CSK ランダムアクセス方式および DS/SS 方式のスループットを示す。ここで、オフロードは 1 つの DS/SS パケット時間当たりに発生するパケット数と定義する。実線は DS/SS 方式のスループット、点線は直交符号を用いる CSK、破線は陪直交符号を用いる CSK のスループットを示す。図より、CSK ランダムアクセス方式のスループットは DS/SS 方式よりも高いスループットを達成できることがわかる。CSK ランダムアクセス方式の同時送信しうる期間が DS/SS の場合よりも短いため、パケット誤り率を削減できる。

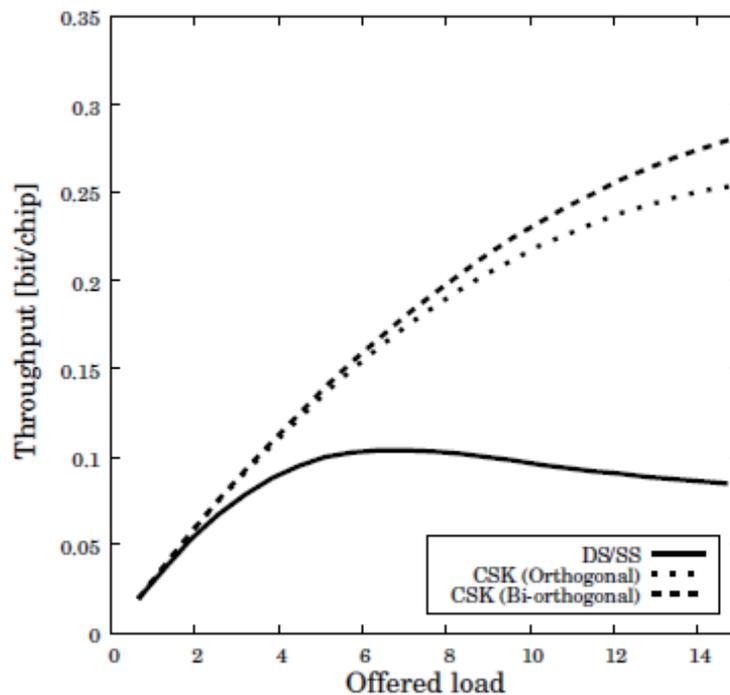


図 2 : オファードロードに対するスループット

図 3 にオファードロードに対する CSK ランダムアクセス方式および DS/SS 方式の消費エネルギーを示す。実線は DS/SS 方式の消費エネルギー，点線は直交符号を用いる CSK，破線は陪直交符号を用いる CSK の消費エネルギーを示す。図より，オファードロードが増加するにしたがって，消費エネルギーが増加することがわかる。これは，オファードロードが増加するにしたがって，干渉量が増加し，パケット誤り率が高くなるためである。また，図より，CSK ランダムアクセス方式の消費エネルギーは DS/SS 方式よりも消費エネルギーが低いことがわかる。

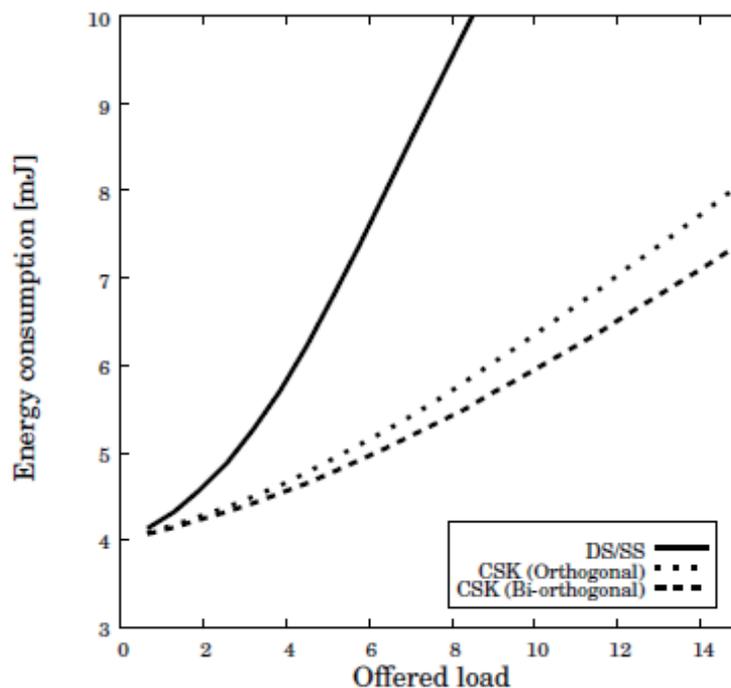


図 3 : オファードロードに対する消費エネルギー

図4に送信エネルギーに対するCSKランダムアクセス方式およびDS/SS方式の消費エネルギーを示す。図5に送信エネルギーに対するCSKランダムアクセス方式およびDS/SS方式の最大スループットを示す。図4はオフロードが15の場合の消費エネルギーを示す。実線はDS/SS方式、点線は直交符号を用いるCSK、破線は倍直交符号を用いるCSKの性能を示す。最大スループットは、送信エネルギーが高くなるにしたがって改善する。一方、送信エネルギーが非常に低い場合、受信成功確率が非常に低くなる。そのため、送信エネルギーが低い場合、消費エネルギーが高くなることがある。送信エネルギーが3.5のとき、消費エネルギーと最大スループット性能が良好であり、この値は送信エネルギーの最適値であると考えられる。また、図より、消費エネルギー、最大スループットともに、CSKランダムアクセス方式の性能はDS/SS方式の性能よりも良好であることがわかる。

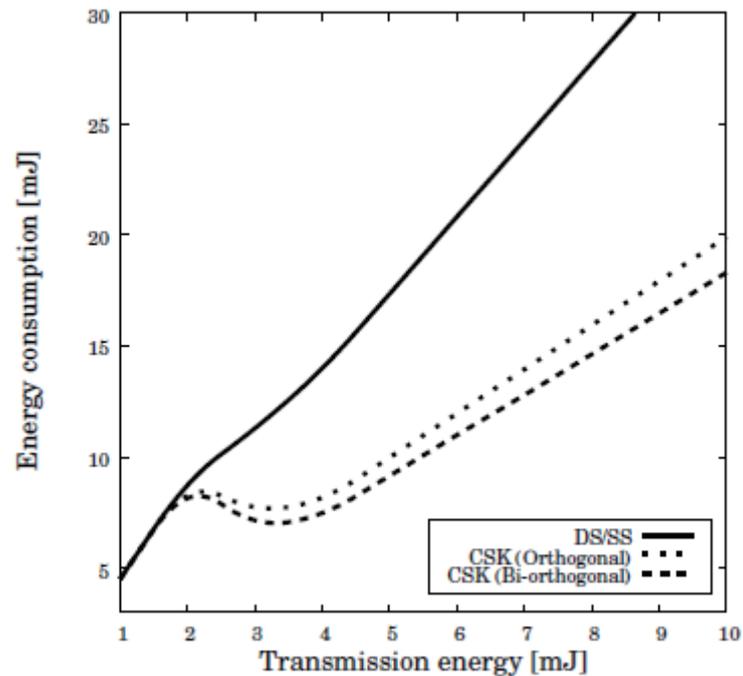


図4：送信エネルギーに対する消費エネルギー

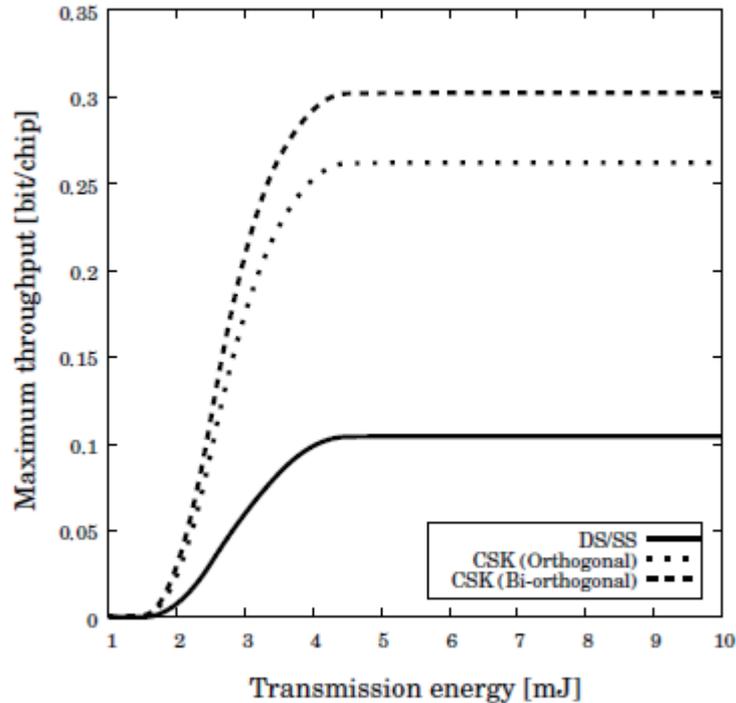


図5：送信エネルギーに対する最大スループット

6 まとめ

本研究では,CSK を用いるランダムアクセス方式のエネルギー削減効果を定量的に示し,性能を評価した.さらに,CSK ランダムアクセス方式と従来方式である DS/SS 方式の特性を比較した.その結果,以下のことがわかった.

- 送信エネルギーを非常に小さくした場合,消費エネルギーは抑えられるが,パケット誤り率が高くなるため,スループットは低くなる.結果として,消費エネルギーが増大する
- CSK ランダムアクセス方式は,スループット・消費エネルギーともには DS/SS よりも良い性能を示す

以上より,CSK ランダムアクセス方式は,スループットを劣化させることなく消費エネルギー削減効果を得られることが定量的に示された.

今後の課題として,消費エネルギーおよびスループット性能を良好に保つための CSK ランダムアクセス方式の最適設計,スリープ制御などの消費エネルギー削減 MAC プロトコルプロトコルとの融合による消費エネルギー削減方式などが挙げられる.

【参考文献】

- [1] I. Demirkil, C. Ersoy, and F. Alagoz, "MAC Protocols for Wireless Sensor Networks: A Survey," IEEE Commun. Mag., Vol.44, Issue 4. pp.102-114, April 2006.
- [2] A. Jamalipour, T. Wada, and T. Yamazato, "A Tutorial on Multiple Access Technologies for Beyond 3G Mobile Networks," IEEE Commun. Mag., Vol.43, Issue 2. pp.110-117, Feb. 2005.
- [3] M. D. Moghaddam, H. Bakhshi, G. Dadashzadeh, "Interference management for DS-SS receiver through base station assignment in multipath fading channels," Proc. IEEE WCINS, pp.257-263, Aug. 2010.
- [4] Z. Zhou, T. Tang, Y. Zhang, G. Feng, "Cross-layer admission control based on service upgrading/degrading in CDMA systems with successive interference cancellation," Proc. ICCAS,

pp.153-157, Sept. 2010.

[5] N. Komuro and H. Habuchi, "A Reasonable Throughput Analysis of the CSK/SSMA Unslotted ALOHA System with Nonorthogonal Sequences," IEICE Trans. Fundamentals, Vol.E88-A, No.6, pp.1462-1468, June 2005.

[6] D. Qiao, S. Choi, A. Jain, K. G. Shin, "Adaptive Transmit Power Control in IEEE 802.11a Wireless LANs," Proc. IEEE VTC, vol. 1, pp.433-437, Apr. 2003.

[7] Z. Zhou, S. Zhou, J.H. Cui, S. Cui, "Energy-Efficient Cooperative Communication Based on Power Control and Selective Single-Relay in Wireless Sensor Networks," IEEE Trans. Wireless Communications, vol. 7, Issue 8, pp.3066-3078, Aug. 2008.

[8] Y. Kim, J. Yu, S. Choi, "SP-TCP: A Self-Protective Energy Efficient Communication Strategy for IEEE 802.11 WLANs," Proc. IEEE VTC, vol. 3, pp.2078-2082, Sep. 2004.

[9] Q. Chen, M.C. Gursoy, "Energy-efficient Modulation Design for Reliable Communication in Wireless Networks," Proc. CISS, pp. 811-816, Mar. 2009.

[10] N. Komuro, H. Sekiya, S. Sakata, "Energy Efficiency of Code Multi-level Modulation-used Wireless Random access Network," Proc. NCSP, pp. 215-218, Mar. 2011.

[11] A. Goldsmith, "Wireless Communications," Cambridge University Press, 2005.

発 表 資 料

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
[ポスター講演]符号多値変調方式を用いた無線ランダムアクセスネットワークの消費エネルギー削減効果に関する検討	電子情報通信学会技術研究報告・ワイドバンドシステム研究会	2010年10月
Energy Efficiency of Code Multi-level Modulation-used Wireless Random access Network	2011 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits Communications and Signal Processing	2011年3月
Energy Efficient Wireless Random Access Network with Code based Multi-level Modulation Scheme	Journal of Signal Processing	投稿中