

基于联合算法的 OFDM 峰均比降低技术

韩庆文, 谷友方, 王 韬

(重庆大学通信工程学院, 重庆 400030)

摘 要: 针对 OFDM 系统具有较高峰均功率比(PAPR)的缺点, 提出一种降低系统峰均比的联合算法——修正的 ACE-POCS 和限幅联合算法。该联合算法利用 ACE-POCS 算法对 OFDM 信号进行处理, 再用限幅法进一步降低 PAPR。基于 OFDM 系统的仿真结果表明, 该联合算法可以有效降低 PAPR 3.5 dB, 并且不会影响系统误码率性能。

关键词: 正交频分复用; 峰均功率比; 活跃星座图扩展; 限幅

OFDM PAPR Reduction Technology Based on Union Algorithm

HAN Qing-wen, GU You-fang, WANG Tao

(College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

【Abstract】 To overcome the shortcoming of high Peak-to-Average Power Ratio(PAPR) in Orthogonal Frequency Division Multiplexing(OFDM) system, a union algorithm of improved ACE-POCS and clipping is proposed for PAPR reduction. The union algorithm uses ACE-POCS to process OFDM signal to reduce PAPR, then the result is processed by clipping to further reduce PAPR. System simulation based on OFDM shows that proposed union algorithm can reduce system PAPR 3.5 dB efficiently without degrading the Bit-Error Ratio(BER) performance.

【Key words】 Orthogonal Frequency Division Multiplexing(OFDM); Peak-to-Average Power Ratio(PAPR); active constellation extension; clipping
DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2011.04.040

1 概述

正交频分复用(OFDM)是无线通信系统中的一项关键技术, 是一种多载波传输技术。多载波传输技术相对于单载波技术而言有很多优点, 例如抗多径干扰、抗突发噪声和有效地克服频率选择性衰落。但 OFDM 技术的一个主要缺点就是具有很高的峰均功率比(Peak-to-Average Power Ratio, PAPR), 这限制了其广泛的应用。高的 PAPR 将使系统需要很大的动态线性范围和高功率的放大器, 这将增加系统的成本和功耗。

目前已经有许多方法用来降低 OFDM 系统的 PAPR, 包括限幅法(Clippling)^[1]、选择性映射(SLM)^[2]、部分传输序列(PTS)^[3]、预编码^[4]、星座图扩展方法^[5]等。然而这些方法应用起来往往十分繁琐, 特别是子载波数量很大时(如地面数字电视广播), 很多方法都不实用。

本文对 ACE-POCS 算法进行了修正, 提出了一种修正 ACE-POCS 算法, 并将其与限幅法相结合, 给出了一种修正 ACE-POCS 法与限幅联合降低 OFDM 系统 PAPR 的新方法, 即先对 OFDM 信号经过 ACE 算法降低高峰值信号出现的概率, 再对得到的信号进行限幅处理。该算法不仅可以有效降低系统的 PAPR, 还能使算法对系统 BER 性能产生的影响最小, 实现了计算量、误码率和降低 PAPR 三方面的折中。

2 峰均比的定义

OFDM 符号由多个独立的经过调制的子载波信号叠加而成, 如果多个信号的相位一致, 所合成的叠加信号的瞬时功率就会远大于信号的平均功率, 导致较大的峰值平均功率比, 简称峰均比。对于一个有 N 个子载波的 OFDM 系统, 其复数基带信号可表示为:

$$x(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} X_n e^{j2\pi n \Delta f t} \quad 0 \leq t < T \quad (1)$$

其中, Δf 为子载波间的频率间隔; X_n 为第 n 个子载波上的

传输符号; T 为 OFDM 信号的发射周期。

定义 OFDM 信号的峰均比(PAPR)为:

$$PAPR = \frac{\max_{0 \leq t < T} |x(t)|^2}{E[|x(t)|^2]} \quad (2)$$

即 OFDM 信号的最大瞬时功率与平均功率的比值, 其中, $E[\cdot]$ 表示 $x(t)$ 的数学期望。通常用 PAPR 的互补累积分布函数(CCDF)来衡量 PAPR 的改善效果, CCDF 定义为超过给定 PAPR 门限的 OFDM 信号的概率。

OFDM 信号的 PAPR 比较大的原因在于: 根据式(1), OFDM 信号是调制符号数据的叠加, 当要传输的信息的一致性较大, 且此时子载波调制的相位一致, 就会产生很大的峰值信号, 导致 OFDM 信号具有很大的 PAPR。因此降低 OFDM 信号 PAPR 的关键在于避免子载波调制数据的相位一致性, 使得 OFDM 的峰值信号大大降低, 从而降低 OFDM 信号的 PAPR。

3 降低 PAPR 的 2 种方法

3.1 ACE 方法的原理与性能

ACE 是一种非双射的星座图技术^[5]。ACE 方法的思想可通过对在每一子信道 QPSK 调制的 OFDM 系统简单地来解释。

在加性 Gauss 信道下, 接收机的最大似然判决区域就是以坐标轴为边界的 4 个象限。也就是说, 对接收机接收的信号而言, 只要是接收到的数据符号没有跑到其他象限中, 那

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(NSTC60872038); 重庆市自然科学基金资助项目(CSTC2008BB2325); 重庆大学 211 工程三期创新人才培养计划建设基金资助项目(S-09102)

作者简介: 韩庆文(1969 -), 女, 高级工程师, 主研方向: 无线通信; 谷友方, 硕士研究生; 王 韬, 讲师

收稿日期: 2010-08-06 **E-mail:** hqw@ccee.cqu.edu.cn

么数据接收就是正确的。在每一个时钟周期中,星座图中的4个星座点只能有一个点被传输,如果接收到的数据星座点在其他3个象限中,则产生一个错误。如果把相应的星座点的位置向外扩展,就相当于稍微增大了QPSK星座点间的欧氏距离,那么接收的数据错误率就会稍微降低。在这一前提下,可以适当地扩展传输信号的星座图,使得传输信号的幅度和相位发生改变,从而能够避免子载波调制的相位一致情况。同时,扩展的星座图提供了更多的判决空间空余,这些空余保证了更低的误码率(假设在高斯白噪声情况下)。图1给出了星座图扩展的示例,其中的阴影区域代表的是QPSK星座点符号的第1象限可用的判决空间空余的区域。

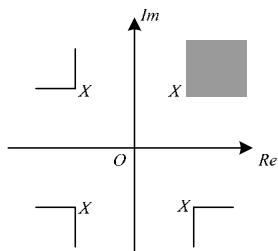


图1 QPSK星座点扩展原理

实际上,对于OFDM信号而言,传输信号星座点的改变相当于在传输信号上叠加了一些正弦或余弦信号,这些叠加的信号改变了最初传输信号的幅度和相位。若能够适当地改动某些星座点,这些叠加的信号就能有效地消除OFDM信号的时域峰值,从而降低OFDM信号的PAPR。

从数学的角度来看,星座图扩展方法降低OFDM信号PAPR的问题可以表示为:

$$\min_{C \in C_c} \max |\tilde{x}[n]|^2 \quad (3)$$

其中,

$$\tilde{x}[n] = x[n] + c[n] = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} (X_k + C_k) e^{j2\pi kn/N} \quad (4)$$

其中, C 表示扩展向量,即是在传输信号上叠加的正弦或余弦信号; C_k 表示各个扩展值; C_c 表示符合扩展约束条件的扩展向量集。

数学描述的ACE算法涉及最大值最小化的问题,这种问题要得到它的最优解是非常困难的,而且计算量较大,缺乏工程可实现性。文献[5]提出了一种可以得到次最优解的算法——凸集投影法(Projection Onto Convex Sets, POCS),能够完成ACE的工程实现。

算法实现流程如下:

- (1) 输入数据 X 经 IFFT 运算获得输出 x 。
- (2) 对 $|x(n)|$ A 的 IFFT 输出限幅,得:

$$\tilde{x}(n) = \begin{cases} x(n) & |x(n)| < A \\ A e^{j\theta(n)} & |x(n)| \geq A \end{cases} \quad (5)$$

其中, $x(n) = |x(n)| e^{j\theta(n)}$ 。

- (3) 对 \tilde{x} 做 FFT, 得到 \tilde{X} 。

- (4) 以 \tilde{X} 替代 X , 进行 IFFT 运算。

(5) 返回(1), 重复上述过程直到所有点都比门限值低为止。

ACE-POCS 算法使得星座图发生扩展^[5], 与图1理论值比较可知, 此时星座图以0.707为中心扩展, 而理论ACE方式则以0.707向外扩展, 必然导致发射功率的增加; 另外, 由于该方法涉及到 IFFT 和 FFT 运算, 多次迭代会导致计算

量过大, 因此仿真是基于一次调整进行的, 从图2的PAPR性能可以看出, 虽然在CCDF为 10^{-4} 时获得了5 dB左右的改善, 但是依旧难以达到系统设定PAPR门限值(本系统门限值设定为7.5 dB)。

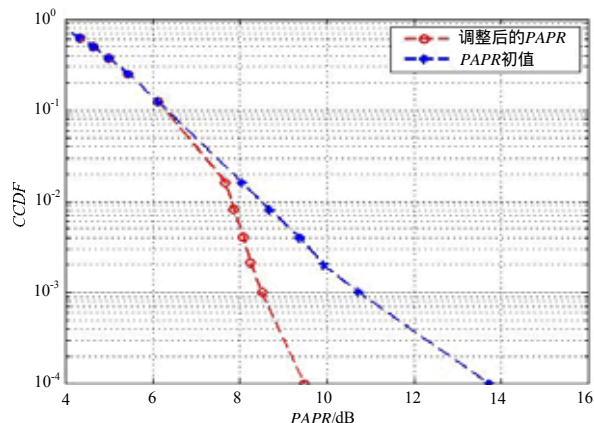


图2 ACE-POCS算法的PAPR性能

文献[5]的仿真结果证明, 该方法会带来大约1.01 dB的功率增益。

鉴于传统ACE-POCS法的功率增益问题以及复杂度问题, 本文提出一种修正ACE-POCS算法, 具体流程如下:

- (1) 输入数据 X 经 IFFT 运算获得输出 x 。
- (2) 对 $|x(n)|$ A 的 IFFT 输出限幅, 得:

$$y(n) = \begin{cases} 0 & |x(n)| < A \\ x(n) - peak_{th} & |x(n)| \geq A \end{cases} \quad (6)$$

- (3) 对 y 做 FFT, 得到 Y , 令:

$$\tilde{X} = X - Y \quad (7)$$

- (4) 以 \tilde{X} 替代 X , 进行 IFFT 运算, 输出。

修正ACE-POCS法星座图以0.707为中心扩展, 扩展分布均匀, 不会带来功率增益。由图3可知, PAPR改善量较之传统ACE-POCS法高0.5 dB左右, 且并无误码率损失(限于篇幅, 选取部分实验结果罗列); 从实现流程可知, 修正ACE-POCS法不仅带来幅度的变换, 且产生了小范围的相移, 结合幅度与相移调整, 使得ACE-POCS法对PAPR的改善能力强于普通ACE-POCS法。

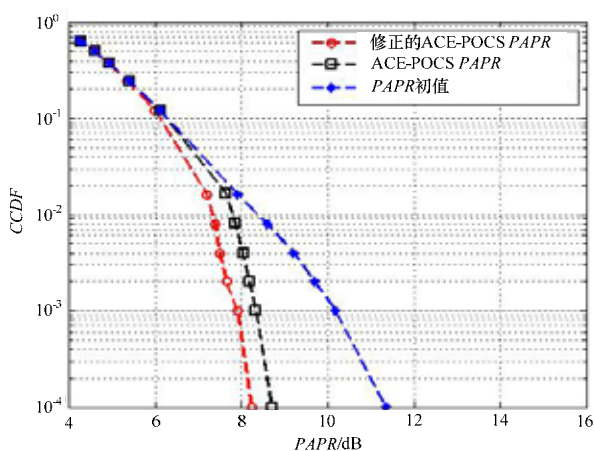


图3 修正ACE-POCS算法的PAPR性能

经过修正ACE-POCS算法之后, 系统的PAPR已经接近系统门限值, 除个别点外, 大部分的功率输出值已经降到7.5 dB以下, 此时可采用限幅法进一步降低PAPR, 带来的BER损失将在可接受范围内。

3.2 限幅法的原理与性能

限幅法(Clipping)又叫做削波法或剪切法^[1],它是降低 PAPR 最简单直接、最有效的一种方法,但会导致 OFDM 系统的误码率性能的恶化。限幅的基本原理是将 IFFT 后的时域信号通过一个限幅器,输出信号的幅度被限制在一个给定的门限值以下,同时保持它的相位不变。因此,限幅门限选得越低,降低系统 PAPR 的性能就越好。

设经过 OFDM 调制(IFFT)后的输出信号为:

$$x_k = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} X_n e^{j2\pi nk/N} \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (8)$$

该信号序列经过限幅后的输出为:

$$\tilde{x}_k = \begin{cases} x_k & |x_k| < Th \\ Th \cdot e^{j\phi(x_k)} & |x_k| \geq Th \end{cases} \quad (9)$$

其中, $\phi(x_k)$ 为信号 x_k 的相位; Th 是给定的限幅门限。通常用一个归一化的限幅门限,即限幅率(CR)来衡量限幅水平,即:

$$CR = Th/\sigma \quad (10)$$

其中, σ 为 OFDM 信号平均功率的均方根值。

限幅技术直接限制了 OFDM 系统中大幅度信号的出现,因此经限幅处理后的信号的 PAPR 大大降低;但是限幅是一个非线性过程,会降低整个系统的误码率性能和频谱效率。应用限幅法后那些较高的峰值均被限制在门限值以下,从而能有效降低系统的 PAPR。

4 本文算法

4.1 算法原理及流程

本文采用修正 ACE-POCS 及限幅联合算法降低 PAPR,原理框图如图 4 所示。

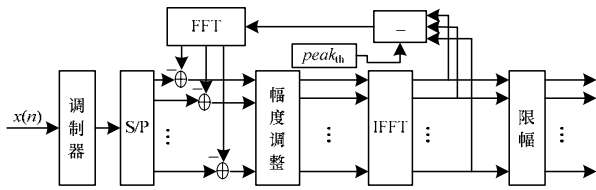


图 4 联合算法的原理框图

输入信号经过 IFFT 运算后,先经过修正 ACE-POCS 算法降低 PAPR,然后采用限幅法,具体流程如下:

- (1)输入数据 X 经 IFFT 运算获得输出 x 。
- (2)对 $|x(n)|$ 的 IFFT 输出限幅,得:

$$y(n) = \begin{cases} 0 & |x(n)| < A \\ x(n) - peak_{th} & |x(n)| \geq A \end{cases}$$

- (3)对 y 做 FFT,得到 Y ,令:

$$\tilde{X} = X - Y$$

- (4)以 \tilde{X} 替代 X ,进行 IFFT 运算,输出。

- (5)计算 PAPR,如果 $PAPR > PAPR_{th}$,进行限幅处理,反之则结束。

4.2 ACE 算法中削波幅度 A 的选择

削波幅度 A 的选择对于获得最优的 PAPR 来说至关重要。 A 的取值过小,会导致削波部分 $y(n)$ 中的非零元素过多,从而增加算法的计算量;但如果 A 的取值过大,则得不到较好的 PAPR 改善效果。在仿真系统中,取 $A = 2\{E[X(n)]\}$ 可以获得较好的峰均比的降低。

4.3 复杂度分析

如上所述,只要修正 ACE-POCS 法中的削波幅度选择合

适, $y(n)$ 中只有少量的抽样值为非零,则用来计算 $y(n)$ 的频域数据 Y 的计算量减小,因此可以降低 ACE 算法的计算复杂度;同时,普通 ACE-POCS 算法至少要 3 次迭代才能得到较好的 PAPR 改善效果,也即需要 3 次 IFFT/FFT,计算量很大,而修正的 ACE-POCS 算法仅需 1 次迭代即可;另一方面,在联合算法中设置了一个 PAPR 门限,仅对 ACE 算法之后 PAPR 值大于门限的 OFDM 信号进行限幅操作,进一步降低了算法的计算复杂度。

5 算法仿真及分析

5.1 仿真条件

采用 Matlab 在 802.11a 无线局域网标准的背景下对本文提出的联合算法进行仿真。算法的性能用 PAPR 的 CCDF 曲线和 BER 性能曲线进行描述。具体的仿真条件如表 1 所示。

表 1 仿真参数

参数	取值
调制方式	QPSK
子载波数	64
数据子载波数	52
传输符号数	10^4
$PAPR_{th}/dB$	7.5

5.2 仿真结果

图 5 给出采用联合算法的 OFDM 信号与采用修正 ACE-POCS 算法及原始 OFDM 信号(图中为 Original)的 PAPR 的比较。

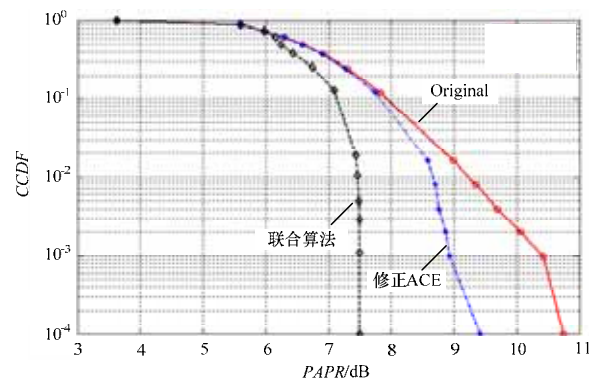


图 5 采用不同算法时的 PAPR 比较

从图 5 可以看出,在 10^{-4} 概率处,本文提出的联合算法比修正的 ACE 算法多降低了 PAPR 约 2 dB,且比未采用算法的原始 OFDM 信号相比有将近 3.5 dB 的 PAPR 改善效果。

图 6 所示为在白高斯噪声(AWGN)信道条件下,采用联合算法的 OFDM 信号与采用修正 ACE-POCS 算法及原始 OFDM 信号的误码率性能的比较。

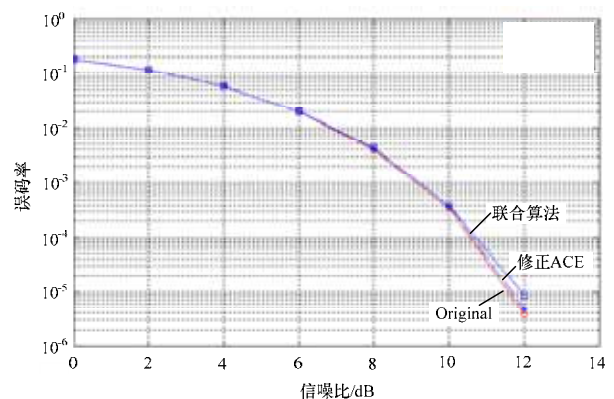


图 6 采用不同算法时的 BER 性能比较

从图6可见,在相同的信噪比条件下,修正的ACE-POCS法与原始OFDM系统的误码率相比几乎没有损失;而由于联合算法中采用了限幅法,使得BER性能与单纯使用ACE时的情况稍差一些,在BER为 10^{-5} 时有0.3 dB的性能损失,但相对于3.5 dB的PAPR改善来说,BER性能的轻微降低是可以接受的。

6 结束语

本文提出了一种修正的ACE-POCS算法,并将其与限幅法级联起来,达到了计算复杂度、PAPR改善与BER性能三者的折中。修正的ACE-POCS法可以在不损失误码率性能的前提下,降低PAPR;由于ACE算法已经使得高峰值信号出现的概率非常低,再进行限幅时仅对很少的一部分信号进行畸变,并不会影响系统的性能。系统仿真结果表明,该算法以系统BER性能的轻微降低为代价可以获得很好的PAPR改善效果。缺点是修正ACE-POCS法适合于采用MPSK调制的OFDM系统,对于QAM调制还需进一步的研究改善。对于采用MPSK调制的OFDM系统而言,由于没有额外的开销信息需要传输,因此不会损失系统的吞吐量,而且接收机的结

构也不需要改动;且算法的复杂度很小,能够满足系统的实时性要求。

参考文献

- [1] Ojima M, Hattori T. PAPR Reduction Method Using Clipping and Peak-windowing in CI/OFDM System[C]//Proc. of Vehicular Technology Conference. Baltimore, USA: [s. n.], 2007: 1356-1360.
- [2] Heo S J, Noh H S, No J S, et al. A Modified SLM Scheme with Low Complexity for PAPR Reduction of OFDM Systems[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2007, 53(4): 804-808.
- [3] 鞠占生, 谢绍斌, 牟薪苇. 减小OFDM信号PAPR的PTS方法研究[J]. 微计算机信息, 2008, 24(15): 148-149.
- [4] Slimane S B. Reducing the Peak-to-Average Power Ratio of OFDM Signals Through Precoding[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2007, 56(2): 686-695.
- [5] Brain S K, Douglas L J. PAR Reduction in OFDM via Active Constellation Extension[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2003, 49(3): 258-268.

编辑 任吉慧

(上接第109页)

参考文献

- [1] Toor Y, Mühlethaler P, Laouiti A, et al. Vehicle Ad hoc Networks: Application and Related Technical Issues[J]. IEEE Communication Surveys & Tutorials, 2008, 10(3): 74-88.
- [2] 冯金生, 薛广涛, 李明禄. 车载自组织网络中被动地理路由算法[J]. 计算机工程, 2009, 35(17): 115-116, 119.

- [3] Jin Wenlong, Recker W W. An Analytical Model of Multihop Connectivity of Inter-vehicle Communication Systems[J]. IEEE Transaction on Wireless Communications, 2010, 9(1): 106-112.
- [4] Jin Wenlong, Recker W W. A Monte Carlo Simulation Model of Inter-vehicle Communication[EB/OL]. (2007-08-15). [http://www.its.uci.edu/~wjjin/publications/\[J12\]%20jin2007mc.pdf](http://www.its.uci.edu/~wjjin/publications/[J12]%20jin2007mc.pdf).

编辑 顾逸斐

(上接第111页)

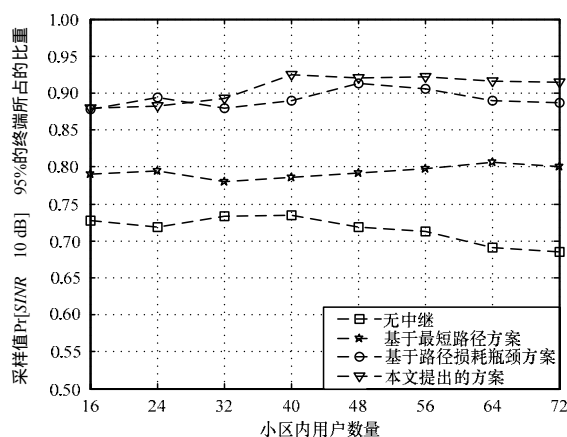


图4 小区覆盖能力与用户数的关系

5 结束语

本文针对IEEE802.16j MMR网络提出一种基于路径损耗和SINR的中继选择算法,仿真分析结果表明此方法可以有效降低中断概率和提高网络的稳健性。在实际应用中考虑到基站与中继站的费用比大约为100:1,以及基站的功率消耗和维护成本,设置中继站代替一部分基站的结果是非常显著

的。中继站还可以实现负载均衡、空时编码等更多的功能。针对移动台具有高移动性以及传输路径多于两跳情况下的中继选择方案需要以后进一步研究。

参考文献

- [1] 赵雪,王平,单联海,等. 基于负载均衡的多跳中继网络接纳控制算法[J]. 计算机工程, 2009, 35(23): 81-83.
- [2] IEEE 802.16j WG. IEEE 80216j-06/026r4-2007 Baseline Document for Draft Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems Multi-hop Relay Specification[S]. 2007.
- [3] Sreng V. Relayer Selection Strategies in Cellular Networks with Peer-to-Peer Relaying[C]//Proc. of IEEE Vehicular Technology Conference. Orlando, USA: [s. n.], 2003: 1949-1953.
- [4] Tian Hui, Gu Xuelin, Zhang Ping. The Impact of Relaying Strategies on the Performance in Cellular System[C]//Proc. of IEEE International Symposium on Communications and Information Technology. Beijing, China: [s. n.], 2005: 1404-1407.
- [5] Rappaport T S. 无线通信原理与应用[M]. 2版. 周文安, 付秀华, 译. 北京: 电子工业出版社, 2006.

编辑 任吉慧