

双光互注入半导体激光器混沌同步通信研究

孙巍阳*, 胡宝洁, 王航

中国洛阳电子信息装备试验中心, 河南 洛阳 471000

摘要 将双光互注入半导体激光器作为混沌光发射源, 构建了受环境影响较小、稳定性较好的全光纤型混沌同步通信系统, 并从延时特征的隐藏、接收与发射激光器的互相关性及输出混沌光带宽三方面研究该系统的同步通信能力。使用自相关函数及互信息函数等数学工具仿真计算该系统外腔反馈延时特征峰值、发射与接收激光器的互信息函数峰值及系统输出混沌光带宽。研究表明, 通过适当调整参数使发射与接收激光器高度同步, 双光互注入系统外腔反馈延时特征峰值可减小至 0.1899, 比相同条件下单光互注入的延时特征峰值降低了 0.1696, 接收和发射激光器最大互相关系数为 0.9113。此外, 21 GHz 的中心频率失谐能将输出光带宽展宽到 3.319 GHz。经实验验证, 双光互注入系统产生的混沌载波能很好地隐藏实验用的正弦波信号, 并且能够在接收端成功解调。

关键词 激光器; 双光互注入; 半导体激光器; 混沌同步; 通信

中图分类号 O415; N93

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.211404

Chaos Synchronization Communication Based on Dual-Path Mutual Coupling Semiconductor Lasers

Sun Weiyang*, Hu Baojie, Wang Hang

Luoyang Electronic Equipment Test Center, Luoyang, Henan 471000, China

Abstract We build a chaos synchronization communication system with less environmental impact and better stability, using the dual-path mutual coupling semiconductor laser as a transmitter of chaotic light. The communication capability of this system is studied from the hiding of time delay characteristics, the correlation between the transmitting and receiving lasers, and the output chaotic optical bandwidth. The peaks of the feedback time delay characteristics of the external cavity of this system, the peaks of the mutual information function of the transmitting and receiving lasers, and the output chaotic optical bandwidth of the system are calculated by using mathematical tools such as autocorrelation function and mutual information function. The peak value of feedback time delay characteristic of the dual-path mutual coupling system can be reduced to 0.1899 when the transmitting and receiving lasers are synchronized by adjusting the parameters, which is 0.1696 lower than the characteristic peak value of a single-path mutual coupling system under the same conditions. The maximum cross correlation coefficient between receiving and transmitting lasers is 0.9113. In addition, the central frequency detuning up to 21 GHz can broaden the output optical bandwidth to 3.319 GHz. The experiment verifies that the chaotic carrier generated by the dual-path mutual coupling system can hide the sinusoidal signal well and successfully demodulate at the receiver.

Key words lasers; dual-path mutual coupling; semiconductor laser; chaos synchronization; communication

OCIS codes 140.5960; 140.1540; 190.3100; 060.4510

1 引言

近年来,混沌同步在保密通信方面的研究飞速发展。相比于传统的算法层加密方式,在物理层加

密的混沌保密通信具有更好的安全性^[1]。由于稳态激光器在光反馈、光电反馈、外光注入等外部扰动下很容易进入混沌态实现混沌输出,所以基于激光器输出混沌光的保密通信及物理随机码生成技术受到

收稿日期: 2019-04-15; 修回日期: 2019-04-28; 录用日期: 2019-05-06

基金项目: 军内科研项目

* E-mail: 785538634@qq.com

了越来越多国内外研究者们的关注^[2-7]。其中,固体激光器^[8-9]、气体激光器^[10]、掺铒光纤激光器^[11]以及半导体激光器等不同种类激光器的混沌输出、混沌同步以及通信等方面的研究取得了突破性进展。二十世纪九十年代初美国马里兰州立大学的 Ott 等^[12]提出了基于参数扰动的控制方法,第一次实现了混沌系统控制。首例混沌同步实验是二十世纪九十年代初美国学者 Pecora 等^[13]在电子学线路的专门设计的实验中实现的。我国对混沌同步通信进行系统性研究始于二十世纪九十年代中期,裴留庆教授等^[14]提出一种改善安全性能的多级调制混沌通信系统;钟国群教授^[15]首次在国内进行混沌通信的硬件实验研究;罗晓曙教授等^[16]提出了基于混沌渐进同步的数字保密通信方法。以上研究工作和成果,对我国混沌同步通信研究的起步和发展起到了很大的促进和推动作用。

早期的互注入技术虽然能实现接收激光器和发射激光器的同步,但随着人们对延时系统分析能力的不断提升,从半导体激光器输出混沌信号中提取外腔反馈延时特征进而重构混沌系统已成为可能,这给混沌同步通信的安全性带来了很大的威胁。研究发现,相比于单光互注入,双光互注入系统能显著降低延时特征峰值,降低通信系统被重构的风险,且输出混沌光能满足通信载波需求。

为了增强混沌同步通信系统的稳定性,本文利用两个全光纤型半导体激光器作为混沌光发射源,构建了一个双光互注入混沌同步通信系统,研究了该系统对外腔反馈延时特征的隐藏效果及系统的同步特性。

2 系统模型

图 1 给出了全光纤型双光互注入分布反馈式 (DFB) 半导体激光器混沌同步通信系统结构示意图。两只参数匹配较好的激光器通过光纤、耦合器 (coupler)、偏振控制器 (polarization controller)、两个可调衰减器 (attenuator) 以及两个延时器 (delayer) 连接实现相互耦合。其中,偏振控制器保证了发射和接收激光器的偏振态一致。两个可调衰减器可以控制两路互注入光的互耦合强度。频谱分析仪 (spectrum analyser)、光功率计 (optical power meter)、示波器 (oscilloscope) 用以分析输出混沌信号相关特性。混沌同步 (synchronization of chaos) 部分实现了两激光器输出相减 (其中包括低通滤波), 最后得到需要传输的信息。

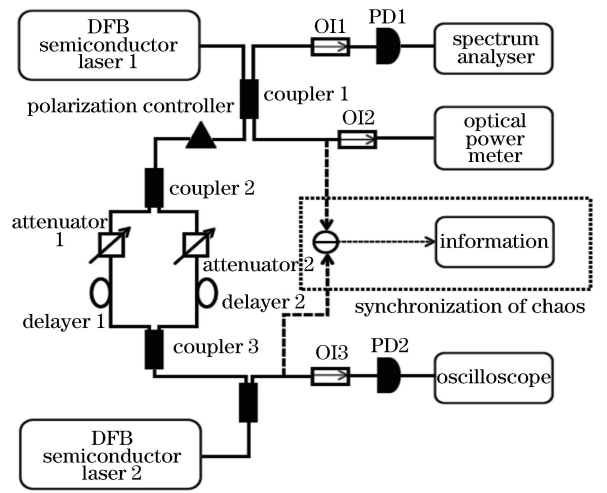


图 1 双光互注入 DFB 半导体激光器混沌同步通信模型
Fig. 1 Model of chaos synchronization communication based on dual-path mutual coupling DFB semiconductor laser

3 理论分析

描述双光互注入半导体激光器混沌同步通信系统的理论模型可以用对应的 Lang-Kobayashi 方程进行表征。其中接收激光器速率方程组为

$$\frac{dE(t)}{dt} = \frac{1}{2} \left\{ G[N(t) - N_0] - \frac{1}{\tau_p} \right\} E(t) + K_1 E(t - \tau_1) \cos \Theta_1(t) + K_2 E(t - \tau_2) \cos \Theta_2(t), \quad (1)$$

$$\frac{d\Phi(t)}{dt} = \frac{\alpha}{2} \{ G[N(t) - N_0] \} - K_1 \frac{E(t - \tau_1)}{E(t)} \sin \Theta_1(t) - K_2 \frac{E(t - \tau_2)}{E(t)} \sin \Theta_2(t), \quad (2)$$

$$\frac{dN(t)}{dt} = J - \frac{N(t)}{\tau_s} - \frac{G[N(t) - N_0]}{1 + \epsilon E^2(t)} E^2(t), \quad (3)$$

$$\Theta_{1,2}(t) = \frac{2\pi c}{\lambda} \tau_{1,2} + \Phi(t) - \Phi(t - \tau_{1,2} - \Delta\omega t), \quad (4)$$

式中: E 为慢变场复振幅, Φ 为相位, N 为有源区内载流子浓度, G 为增益系数, τ_p 为光子寿命, τ_s 为载流子寿命, α 为线宽放大因子, K_1 、 K_2 为两条光路的互耦合强度, τ_1 、 τ_2 为两条光路的注入延时时间, λ 为发射激光器波长, J 为激光器偏置电流, ϵ 为增益饱和系数, $\Delta\omega$ 为激光器的中心频率失谐, $\Theta_{1,2}(t)$ 为随时间变化的角频率角度, t 为时间变量, N_0 为载流子浓度初值。运用四阶 Runge-Kutta 法对该速率方程组进行求解, 其中各参量的值 $\tau_p = 1.927 \times$

10^{-12} s, $\tau_s = 2.5 \times 10^{-9}$ s, $\alpha = 5.0$, $K_1 = K_2 = 25 \times 10^9$ s $^{-1}$, $\lambda = 1.537 \times 10^{-6}$ m, J 为 1.44 倍阈值电流, 激光器阈值电流 $j_{th} = 9.892 \times 10^{32}$ m $^{-3} \cdot$ s $^{-1}$, $\epsilon = 1 \times 10^{-7}$, $N_0 = 1.4 \times 10^{24}$ m $^{-3}$, $\Delta\omega = 20.5$ GHz.

通常用于分析激光器混沌系统外腔反馈延时特征的方法有自相关函数法及局部线性模型法等。本文通过输出混沌光光强自相关函数图来分析外腔反馈延时特征。自相关函数定义为

$$C_s(\Delta t_s) = \frac{\langle [I(t + \Delta t_s) - I(t)][I(t) - \langle I(t) \rangle] \rangle}{[\langle I(t) - \langle I(t) \rangle \rangle^2 \langle I(t + \Delta t_s) - I(t) \rangle^2]^{1/2}}, \quad (5)$$

式中, $C_s(\Delta t_s)$ 为由激光器发出间隔时间为 Δt_s 的两个时刻的激光自相关程度, $I(t)$ 为输出混沌光强时间序列, Δt_s 为移动时间, $\langle \rangle$ 为对时间求平均。

两个激光器的同步性能决定了接收端对信息的还原能力。该同步性能可以用互信息函数峰值定量表示。互信息函数定义为

$$C(\Delta t_s) = \frac{\langle [I_T(t + \Delta t_s) - I_T(t)][I_R(t) - \langle I_R(t) \rangle] \rangle}{[\langle I_T(t) - \langle I_T(t) \rangle \rangle^2 \langle I_R(t + \Delta t_s) - I_R(t) \rangle^2]^{1/2}}, \quad (6)$$

式中, $C(\Delta t_s)$ 为由两个激光器发出间隔时间为 Δt_s

的两个时刻的激光互相关程度, $I_T(t)$ 和 $I_R(t)$ 分别表示发射端和接收端输出混沌光强时间序列。

4 结果分析

图 2 为相同参量下单光互注入(注入延时时间为 10 ns)与双光互注入(两路光注入延时分别为 10 ns, 10.01 ns)系统输出混沌光的光强时间序列、功率谱图及自相关函数图。观察时序图 2(a), (b) 不难发现, 两个系统的输出光强随时间变化均表现出类随机性, 说明单光互注入及双光互注入在合适的注入强度下均能实现混沌输出, 且两者输出光频率分布相近(如图 2(c), (d) 所示)。对比自相关函数图 2(e), (f), 单光互注入的自相关函数在移动时间为 20 ns 处出现延时特征峰, 峰值为 0.3595; 双光互注入自相关函数在相同位置出现了峰值为 0.1899 的延时特征峰, 相较于前者明显降低, 即更好地隐藏反馈延时特征。分析可知, 通过控制注入腔腔长可使两路光的注入延时稍有偏差, 从而增加了混沌系统的随机性, 降低了输出光的自相关性, 成功地隐藏了延时特征峰。

仿真计算单光与双光互注入系统的互信息函数最大互相关系数可以判断两个系统是否能实现良好的同步。图 3 给出了两个系统输出混沌序列的互信

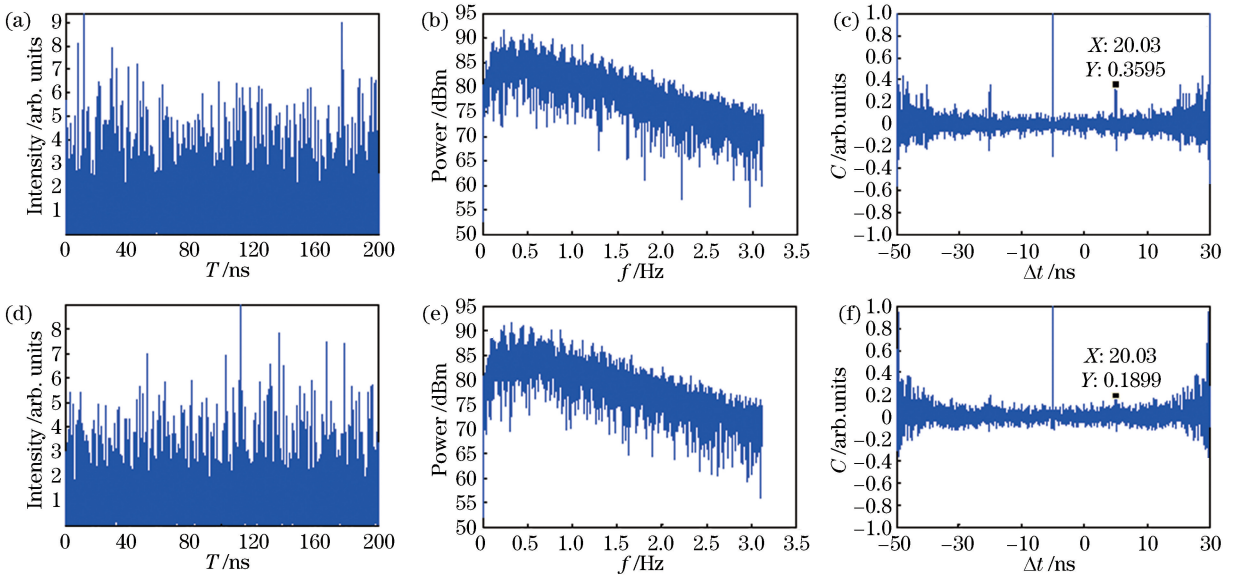


图 2 相同参量下单光互注入与双光互注入系统输出混沌光特性。(a)单光互注入时序图;(b)双光互注入时序图;(c)单光互注入功率谱图;(d)双光互注入功率谱图;(e)单光互注入自相关函数图;(f)双光互注入自相关函数图

Fig. 2 Output chaos optical characteristics of single-path mutual coupling and dual-path mutual coupling systems with the same parameters. (a) Sequence diagram of single-path mutual coupling; (b) sequence diagram of dual-path mutual coupling; (c) spectrum of single-path mutual coupling; (d) spectrum of dual-path mutual coupling; (e) autocorrelation function of single-path mutual coupling; (f) autocorrelation function of dual-path mutual coupling

息函数曲线,其中单光互注入(图 3(a))最大互相关系数为 0.8694,双光互注入(图 3(b))最大互相关系数为 0.9113,因此双光互注入系统的同步性能略优于单光互注入系统,两个系统同步滞后时间均为 10 ns,恰好等于注入延时,说明系统处于强光注入锁定状态。另外,双光互注入的函数曲线在 ± 10.1 ns 的整数倍附近也出现了互相关函数特征峰,这是因为另一个延时为 10.1 ns。

稳态激光器通过外光注入实现混沌光输出,注入光与激光器本身输出光的互耦合即为输出混沌

光,因此当注入激光器与接收激光器的中心频率有所偏差时能在一定程度上展宽输出混沌光带宽。图 4 展示了双光互注入中心频率失谐对发射激光器输出混沌光带宽的影响。由图 4 可以看出,当频率失谐值较小时,带宽在 1.3 GHz 上下浮动;当失谐增加到 20 GHz 附近时,带宽有了突破性的展宽,21 GHz 的失谐使带宽展宽到 3.319 GHz;继续增加失谐值,此时收发激光器的中心频率值偏差过大,带宽反而降低。带宽的展宽意味着信息传输速率的提高,因此搭建系统时激光器中心频率的选取至关重要。

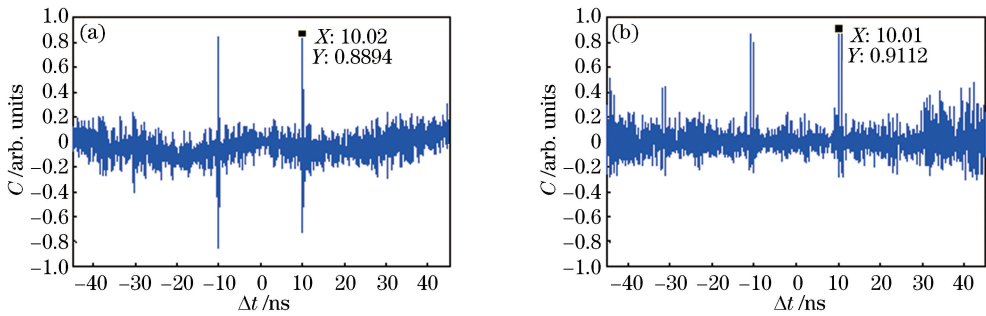


图 3 互信息函数曲线图。(a)单光互注入;(a)双光互注入

Fig. 3 Curves of mutual information function. (a) Single-path mutual coupling; (b) dual-path mutual coupling

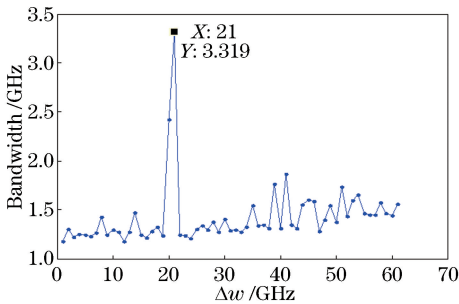


图 4 频率失谐对带宽的影响

Fig. 4 Effect of frequency detuning on bandwidth

选取参数匹配的两台激光器搭建实验平台验证双光互注入系统输出光作为载波信号的可行性。实验证明,双光互注入系统能在高度保密的前提下实现发射和输出激光器的同步。图 5 展示了 1 kbit/s 的正弦波信号在调制前(图 5(a))和解调后(图 5(b))的波形图。可以看出,经过输出相减及滤波处理后的正弦信号能够在接收端成功解调(受到硬件设备的限制,此次实验噪声滤除不彻底)。

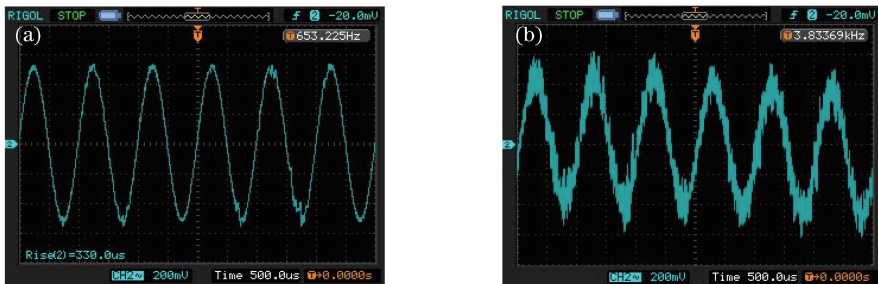


图 5 正弦波信号在解调前和解调后的波形图。(a)解调前;(b)解调后

Fig. 5 Waveforms of sine wave signal before and after detuning. (a) Before detuning; (b) after detuning

5 结 论

提出了一种基于双光互注入的全光纤型半导体激光器混沌同步通信系统,并利用对应的 Lang-

Kobayashi 方程对系统外腔反馈延时特征的隐藏效果、接收与发射激光器的同步性能及输出混沌光带宽等开展了相关仿真研究。研究表明:在相同参量下,单光互注入方案的最大延时特征峰值为 0.3595,

双光互注入方案的最大延时特征峰值为 0.1899, 比前者降低了 0.1696, 对外腔反馈延时特征的隐藏效果更好; 适当参量条件下的双光互注入系统接收和发射激光器能实现较好的同步, 最大互相关系数可达 0.9113; 双光互注入系统的接收与发射激光器中心频率失谐达 21 GHz 时, 能将输出混沌光带宽展宽到 3.319 GHz; 发射端的混沌载波信号能很好地隐藏正弦波信号, 并且能够在接收端成功解调。

参 考 文 献

- [1] Ding L, Wu Z M, Wu J G, *et al.* Unidirectional open-loop chaotic synchronization communication based on a semiconductor laser with double optical feedback[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(1): 014212.
丁灵, 吴正茂, 吴加贵, 等. 基于双光反馈半导体激光器的单向开环混沌同步通信[J]. *物理学报*, 2012, 61(1): 014212.
- [2] Fan L, Xia G Q, Wu Z M. Chaotic parallel synchronization of optoelectronic feedback semiconductor lasers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(2): 989-994.
樊利, 夏光琼, 吴正茂. 基于光电反馈的激光混沌并联同步系统研究[J]. *物理学报*, 2009, 58(2): 989-994.
- [3] Yan S L. Control of chaos in a delayed feedback semiconductor laser via dual-wedges[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(5): 2827-2831.
颜森林. 延时反馈半导体激光器双劈控制混沌方法研究[J]. *物理学报*, 2008, 57(5): 2827-2831.
- [4] Liu H J, Feng J C. Effect of system gain on optical chaotic communications systems [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(3): 1484-1490.
刘慧杰, 冯久超. 系统增益对光混沌通信系统性能影响的研究[J]. *物理学报*, 2009, 58(3): 1484-1490.
- [5] Zhang X J, Wang B J, Yang L Z, *et al.* Flat broadband chaotic carrier generation and synchronization[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(5): 3203-3207.
张秀娟, 王冰洁, 杨玲珍, 等. 平坦宽带混沌激光的产生及同步[J]. *物理学报*, 2009, 58(5): 3203-3207.
- [6] Murakami A, Ohtsubo J. Chaos synchronization based on a continuous chaos control method in

semiconductor lasers with optical feedback[J]. *Physical Review E*, 2001, 63(6): 066203.

- [7] Ortín S, Gutiérrez J M, Pesquera L, *et al.* Nonlinear dynamics extraction for time-delay systems using modular neural networks synchronization and prediction[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2005, 351(1): 133-141.
- [8] Wu L, Zhu S Q. Communications using multi-mode laser system based on chaotic synchronization [J]. *Chinese Physics*, 2003, 12(3): 300-304.
- [9] Sun J, Zhu S Q. Chaotic synchronization of intensities and phases in two multi-mode laser fields [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2005, 22(5): 743-748.
孙坚, 朱士群. 两台多模激光场强度和相位的混沌同步[J]. *量子电子学报*, 2005, 22(5): 743-748.
- [10] Sugawara T, Tachikawa M, Tsukamoto T, *et al.* Observation of synchronization in laser chaos [J]. *Physical Review Letters*, 1994, 72(22): 3502-3505.
- [11] van Wiggeren G D, Roy R. Communication with chaotic lasers[J]. *Science*, 1998, 279(5354): 1198-1200.
- [12] Ott E, Grebogi C, Yorke J A. Controlling chaos[J]. *Physical Review Letters*, 1990, 64(11): 1196-1199.
- [13] Pecora L M, Carroll T L. Synchronization in chaotic systems[J]. *Physical Review Letters*, 1990, 64(8): 821-824.
- [14] Kuang J Y, Pei L Q, Tang X J, *et al.* A multistage chaotic synchronized system for secure communications[J]. *Acta Electronica Sinica*, 1999, 27(6): 23-26.
匡锦瑜, 裴留庆, 汤秀娟, 等. 一种多级混沌同步通信系统[J]. *电子学报*, 1999, 27(6): 23-26.
- [15] Zhong G Q. Secure communication via synchronized Chua's circuits[J]. *Journal of Circuits and Systems*, 1996, 1(1): 19-29.
钟国群. 蔡氏电路混沌同步保密通讯[J]. *电路与系统学报*, 1996, 1(1): 19-29.
- [16] Luo X S, Wang B H, Jiang P Q, *et al.* A method of digital secure communication based on asymptotic synchronization of chaos [J]. *Journal of China Institute of Communications*, 2003, 24(1): 60-65.
罗晓曙, 汪秉宏, 蒋品群, 等. 一种基于混沌渐近同步的数字保密通信方法[J]. *通信学报*, 2003, 24(1): 60-65.