

# GSM-R 信号相关性对同频干扰性能的影响

姜立娜, 朱 刚

(北京交通大学 轨道交通控制与安全国家重点实验室, 北京 100044)

**摘要:**在 GSM-R 移动通信网络建设中应特别注意干扰问题,以便 GSM-R 网络更好地发挥作用。文中首先推导了 GSM-R 线状蜂窝覆盖模式下的同频干扰概率;然后应用 Wilkinson 方法推导了非线性蜂窝覆盖模式下经历阴影衰落的多个相关干扰源情况下的同频干扰概率公式;最后,通过仿真分析,验证了同频干扰概率随着同频复用组增大而减小,经历相关阴影衰落的同频干扰信号间的相关性对同频干扰概率有较小的影响,有用信号与各同频干扰信号间的相关性对 GSM-R 系统同频干扰概率的影响较大。

**关键词:**相关系数;阴影衰落;同频干扰概率;GSM-R

中图分类号:TP39

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2013)04-0258-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2013.04.063

## Effects of GSM-R Signals Correlation on Performance of Co-channel Interference

JIANG Li-na, ZHU Gang

(State Key Lab. of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** In order to better play a role, in GSM-R mobile communication network construction should pay special attention to interference problem. First derive the probability of co-channel interference in GSM-R system where the system is linear covered. And then, derive the probability of co-channel interference applying the Wilkinson method which signals undergo correlated shadowing fading where the system is nonlinear covered. In the end, through the simulation analysis, tested that the probability of co-channel interference is decreasing with increasing the co-channel reusing group, the correlation between co-channel interference undergoing correlated log-normal shadowing has little impact on the probability of co-channel interference, the correlation between useful signal and the each co-channel interference signal has great influence on the probability of co-channel interference in GSM-R system.

**Key words:** correlation coefficient; shadowing fading; co-channel interference probability; GSM-R

### 0 引言

无线通信系统中,干扰信号和信号可以表示成多个服从对数正态阴影衰落的单个干扰信号的叠加<sup>[1]</sup>。由于不同干扰信号在传播路径上被相同的障碍物遮挡,对数正态阴影衰落在很大程度上具有统计相关性,并已通过实际测量得到证实<sup>[2,3]</sup>。经历阴影衰落的信号相关性对同频干扰概率有着显著的影响<sup>[4,5]</sup>。目前,大量关于系统同频干扰性能的理论与研究均是在假设阴影衰落不相关的基础上得到的<sup>[6,7]</sup>,忽略了衰落相

关性对同频干扰概率的影响。

阴影衰落相关性令总的干扰信号的计算以及系统同频干扰概率的计算与分析变得很复杂。为此, Wilkinson<sup>[8]</sup>和 Schwartz and Yeh<sup>[9]</sup>分别提出计算多个不相关的服从对数正态分布的和分布的方法,认为对数正态随机分布的和分布可以用另外一个对数正态分布来表示。

Adnan<sup>[10]</sup>等人将 Wilkinson 和 Schwartz and Yeh 方法扩展至求多个互相关的对数正态分布的和分布,并证明了 Wilkinson 方法更适合于近似计算多个相关的服从对数正态分布的和分布。

因此,文中以 GSM-R 网络环境为背景,应用 Wilkinson 方法推导了线状覆盖和非线状覆盖网络模式的同频干扰概率公式,并分析了阴影衰落相关性对系统同频干扰性能的影响,以期对 GSM-R 系统性能分析提供一定的指导作用。下面对 GSM-R 系统同频干扰进行分析。

收稿日期:2012-07-28;修回日期:2012-10-30

基金项目:轨道交通控制与安全国家重点实验室项目(RCS2008ZZ007);中央高校基本科研业务费(2010JBZ008);国家自然科学基金资助项目(60830001);长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT0949)

作者简介:姜立娜(1986-),女,吉林长春人,硕士研究生,研究方向为个人通信与宽带无线通信;朱 刚,教授,博士生导师,研究方向为个人通信与宽带无线通信。

## 1 GSM-R 同频干扰概率

GSM-R 系统与中国移动通信系统按地域共用频段 885 ~ 889/930 ~ 934MHz, 因此 GSM-R 系统的干扰比其他公众移动通信系统要复杂得多, 其既有系统内干扰, 又有 GSM-R 与其他公众系统间的干扰。同频干扰是由频率复用引起的、在同频小区间产生的系统内干扰。

载干比是评价接收信号质量的性能指标, 用  $S/I$  表示。假设有  $N$  个同频干扰源  $I_1, I_2, \dots, I_N$ , 有用信号接收功率为  $S$ , 则同频干扰载干比为<sup>[11]</sup>:

$$S/I = S / \sum_{i=1}^N I_i \quad (1)$$

下面针对 GSM-R 系统中两种蜂窝覆盖模式分析其各自的同频干扰情况。

### 1.1 GSM-R 线状蜂窝覆盖

为满足铁路沿线线状覆盖, 一般使用八字天线或功分器将一个小区分为两个方向来减少切换, 即铁路沿线一般只需考虑一个同频小区, 即只有一个同频干扰源<sup>[12]</sup>。

文中采用由路径损耗和阴影扩展来表征的双线模型, 发射天线到接收天线有两条路径, 一条是视距传播, 另外一条则是地面反射, 两条路径间的拐点为  $R_b$ 。则路径损耗为<sup>[12]</sup>:

$$L = L_b + 10n \log\left(\frac{d}{R_b}\right) \quad (2)$$

其中,  $n = \begin{cases} n_1 & d \leq R_b \\ n_2 & d > R_b \end{cases}$ ,  $L_b$  表征拐点处的路径损耗

值,  $n_1$  和  $n_2$  的典型值分别是 2 和 4。

设移动台距服务基站的距离为  $x$ , 小区半径为  $R_c$ , 小区重叠覆盖为  $d$ , 频率复用因子  $R$  为正整数, 且有  $R_b < (2R - 1)R_c$ , 则移动台接收信号的信干比可以表示成拐点距离的函数, 即

$$\text{SIR}(x, R_b) = 10 \log(S(x, R_b)/I(x, R_b)) = S_{\text{db}} - I_{\text{db}} \quad (3)$$

式中,  $S(x, R_b)$  和  $I(x, R_b)$  分别为移动台距基站  $x$  处有用信号和干扰信号的接收功率。有用信号与干扰信号服从相关对数正态阴影分布, 即可用均值为零、标准差为  $\sigma$  的高斯随机变量来表征<sup>[12]</sup>, 相关系数为  $r$ 。那么  $\text{SIR}(x, R_b)$  也是服从对数正态分布的, 其均值为

$$m_{\text{SIR}}(x, R_b) = m_{\text{S}}(x, R_b) - m_{\text{I}}(x, R_b) \quad (4)$$

其中,

$$m_{\text{S}}(x, R_b) =$$

$$L_b + 10n \log\left(\frac{2 \times R \times R_c + x - R \times d}{R_b}\right),$$

$$m_{\text{I}}(x, R_b) = L_b + 10n_2 \log\left(\frac{x}{R_b}\right).$$

其方差为  $\sigma_{\text{SIR}}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2r\sigma_1\sigma_2$ ,  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  为有用干扰信号在  $x$  处的阴影扩展。由同频干扰概率定义有<sup>[5]</sup>:

$$P(x, R_b) = \int_0^{\text{SIR}_{\text{th}}} f_{\text{SIR}(x, R_b)}(g) dg \quad (5)$$

在 GSM-R 线状覆盖中, 假设移动台线性均匀分布, 即移动台位置的概率密度函数为:

$$f_x(x) = \frac{1}{2R_c} \quad |x| < R_c \quad (6)$$

则线状蜂窝覆盖的同频干扰概率为<sup>[6]</sup>:

$$F(\text{CI}) = \frac{1}{2\sqrt{2\pi}R_c} \int_0^{R_c} \left[ \frac{1}{\sigma_{\text{SIR}}} \int_0^{\text{SIR}_{\text{th}}} e^{-(g - m_{\text{SIR}})/(2\sigma_{\text{SIR}}^2)} dg \right] dx \quad (7)$$

### 1.2 GSM-R 非线性状蜂窝覆盖

在 GSM-R 网络建设过程中, 存在着不同铁路线路在地理位置上相隔很近、线路并行或相互跨越的情况, 在车站、大型枢纽站存在多条铁路线汇合的情况。为避免切换, 在铁路枢纽地区采用全向基站, 此时, 就会存在多个同频干扰源。

假设  $N$  个服从对数正态阴影衰落同频干扰信号为  $I_1, I_2, \dots, I_N$ , 则干扰信号的和信号可用另一个对数正态分布来表示<sup>[1, 8, 10]</sup>, 即

$$X = 10 \log I = 10 \log \sum_{i=1}^N I_i = m_X + \sigma_X \quad (8)$$

式中,  $m_X$  和  $\sigma_X$  分别为对数正态分布  $X$  的平均值和标准差。考虑到干扰信号间的相关性, 引入一个新的随机变量  $Y_i$ , 使得  $Y_i = \ln I_i$ , 并定义随机变量  $Y_i$  和  $Y_j$  间的相关系数为  $r_{Y_i Y_j}$ , 且有随机变量  $Y_i$  的对数域均值  $m_{Y_i}$  和标准差  $\sigma_{Y_i}$  为  $m_{Y_i} = \beta m_{X_i}$ ,  $\sigma_{Y_i} = \beta \sigma_{X_i}$ , 则有

$$I = e^{Y_1} + e^{Y_2} + \dots + e^{Y_N} \approx e^Z = 10^{X/10} \quad (9)$$

其中, 随机变量  $Z$  和  $X$  都服从对数正态分布, 且有  $Z = \beta X$ , 这里有  $\beta = 0.11 \ln 10$ 。则由 Wilkison 方法求得的  $N$  个对数正态分布的和分布  $X$  的均值  $m_X$  和标准差  $\sigma_X$  为<sup>[1, 8, 10]</sup>:

$$m_X = (1/\beta) (2 \ln u_1 - (1/2) \ln u_2) \quad (10)$$

$$\sigma_X = (1/\beta) \sqrt{\ln u_2 - 2 \ln u_1}$$

其中,

$$u_1 = \exp(m_Z + \sigma_Z^2/2) = \sum_{i=1}^N \exp(m_{Y_i} + \sigma_{Y_i}^2/2) = \sum_{i=1}^N \exp(\beta m_{X_i} + \beta^2 \sigma_{X_i}^2/2)$$

$$u_2 = \sum_{i=1}^N \exp(2\beta m_{X_i} + 2\beta^2 \sigma_{X_i}^2) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \exp\{\beta m_{X_i} + \beta m_{X_j} + (\beta^2/2)(\sigma_{X_i}^2 + \sigma_{X_j}^2 + 2r_{Y_i Y_j} \sigma_{X_i} \sigma_{X_j})\} \quad (11)$$

这里要明确的是, 均值  $m_X$  是大区域场强中值, 表征的是大尺度衰落, 即路径损耗; 标准差  $\sigma_X$  是本地均值电平, 表征的是阴影衰落, 即阴影扩展。

设有用信号的局部场强中值为  $P_{c0}$ , 同频干扰信号和信号的局部场强中值为  $P_{n0}$ , 且  $P_{c0}$  和  $P_{n0}$  均服从对数正态分布, 有用信号的瞬时功率为  $P_c$ , 同频干扰和信号的瞬时功率为  $P_l$ , 则同频干扰概率的条件概率密度函数为<sup>[13]</sup>:

$$F(\alpha \left| \frac{P_{c0}}{P_{n0}} = \mu \right.) = P(z < \alpha \left| \frac{P_{c0}}{P_{n0}} = \mu \right.) = \int_0^\alpha f\left(\frac{P_c}{P_l} \left| \frac{P_{c0}}{P_{n0}} = \mu \right.\right) d\left(\frac{P_c}{P_l}\right) = \int_0^\alpha \frac{\mu}{(z + \mu)^2} dz = \frac{\alpha}{\alpha + \mu} \quad (12)$$

设载波信号的大区域场强中值为  $P_{cr}$ , 同频干扰和信号的大区域场强中值为  $P_{lr}$ , 由大区域场强中值的物理含义得  $P_{lr} = m_x$ ,  $\sigma_2 = \sigma_x$ , 则  $P_{c0}(\text{dBm}) \sim N(P_{cr}, \sigma_1^2)$ ,  $P_{n0}(\text{dBm}) \sim N(P_{lr}, \sigma_2^2)$ ,  $Z = P_{c0} - P_{n0} \sim N(P_{cr} - P_{lr}, \sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2r\sigma_1\sigma_2)$ 。其中,  $r$  是有用信号与干扰信号和信号的相关系数, 可由式(13)推导得出, 其中,  $r_{i0}$  为各干扰信号与有用信号的相关系数。

$$r = \frac{E\{[X - E(X)][S - E(S)]\}}{\sqrt{D(X)} \sqrt{D(S)}} = \frac{E\{[\sum_{i=1}^N X_i - E(\sum_{i=1}^N X_i)][S - E(S)]\}}{\sqrt{D(\sum_{i=1}^N X_i)} \sqrt{D(S)}} = \frac{\text{Cov}(\sum_{i=1}^N X_i, S)}{\sqrt{D(\sum_{i=1}^N X_i)} \sqrt{D(S)}} = \frac{\sum_{i=1}^N \text{Cov}(X_i, S)}{\sqrt{D(\sum_{i=1}^N X_i)} \sqrt{D(S)}} = \frac{\sum_{i=1}^N r_{i0} \times \sqrt{D(X_i)} \times \sqrt{D(S)}}{\sqrt{D(\sum_{i=1}^N X_i)} \sqrt{D(S)}} = \frac{\sum_{i=0}^N r_{i0} \sqrt{D(X_i)}}{\sqrt{D(\sum_{i=1}^N X_i)}} = \frac{\sum_{i=0}^N r_{i0} \times \sigma_{X_i}}{\sigma_X} \quad (13)$$

则由阴影衰落的概率密度函数可得对数正态随机分布  $Z$  的概率密度函数为:

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2r\sigma_1\sigma_2)}} \exp\left(-\frac{(z - (P_{cr} - P_{lr}))^2}{2\sqrt{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2r\sigma_1\sigma_2)}}\right) = \frac{10}{\ln 10 \cdot \sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp\left(-\frac{(10\log z - \mu)}{2\sigma^2}\right) \quad (14)$$

进一步化简得  $P_{c0}/P_{n0} = \mu$  的概率密度函数为:

$$f(P_{c0}/P_{n0} = \mu) = \frac{10}{\ln 10 \cdot \sqrt{2\pi}\sigma\mu} \exp\left(-\frac{(10\log \mu - (P_{cr} - P_{lr}))^2}{2\sigma^2}\right) \quad (15)$$

最后将式(15)代入同频干扰概率公式(5)得 GSM

-R 蜂窝覆盖的同频干扰概率为:

$$F(\text{CI}) = \text{Prob}(v < \alpha) = \int_0^\infty F(\alpha \left| \frac{P_{c0}}{P_{n0}} = \mu \right.) f\left(\frac{P_{c0}}{P_{n0}} = \mu\right) d\mu = \frac{1.7326}{\sigma} \int_0^\infty \exp\left(-\frac{(10\log \mu - (P_{cr} - m_x))^2}{2\sigma^2}\right) d\mu \quad (16)$$

## 2 仿真与分析

下面对 GSM-R 同频干扰概率进行仿真分析。

图 1 为 GSM-R 线状蜂窝覆盖模式的同频干扰概率仿真图。其中, 同频复用组  $R$  为参数, 射频保护比  $\alpha$  为 9dB, 此时只考虑一个干扰源。可以看出, 线状蜂窝覆盖时, 系统同频干扰概率随着同频复用组的增大而减小, 相关系数较大时, 系统的同频干扰概率也相应的比较大。

图 2 和图 3 为 GSM-R 非线状蜂窝覆盖模式下的同频干扰概率仿真图。其中, 考虑余量及衰落储备,  $P_{cr} - P_{lr}$  的取值范围为 50dB, 阴影衰落因子  $\sigma$  表征场强中值的波动程度, 它依赖于地形、地貌、波长等因素, 这里选取典型值  $\sigma = 6.5, 8, 14$ , 射频保护比  $\alpha$  为 9dB,  $N=3$ , 同时, 假设有用信号与各同频干扰信号、同频干扰信号间的相关系数都是相等的。

图 2 表明了同频干扰信号间的相关系数对同频干扰概率的影响。可以看出, 随着同频干扰信号间相关系数的增大, 系统同频干扰概率有增长的趋势, 但是增幅较小, 同时, 大的有用信号与同频干扰信号间的相关系数有较大的同频干扰概率。

图 3 表明了有用信号与干扰信号间相关系数对同频干扰概率的影响。可以看出, 系统同频干扰概率随着有用信号与各干扰信号间相关系数的增大而有明显的增长趋势, 同时, 较大的干扰信号间的相关系数有较大的同频干扰概率, 但增长量较小, 与图 2 的仿真结果相对应。

## 3 结束语

文中从信号相关性角度出发, 研究了 GSM-R 两种蜂窝覆盖模式下的同频干扰性能, 并在多个相关干扰源情况下, 引用 Wilkinson 方法推导了非线状蜂窝覆盖模式的同频干扰概率。结果表明, GSM-R 系统的同频干扰性能不仅会随着同频干扰信号间相关性的增大而增大, 同时也会随着有用信号与各干扰信号间相关性的增大而增大。但是, 需要明确的是, 系统同频干扰性能对同频干扰信号间的相关性并不敏感, 对有用信号与各干扰信号间相关性确有很大的敏感度。文中对衰落现象比较明显的 GSM-R 系统的干扰性能研究有着重要的意义, 在一定程度上指导 GSM-R 网络建设, 以尽量减小信号间相关性。

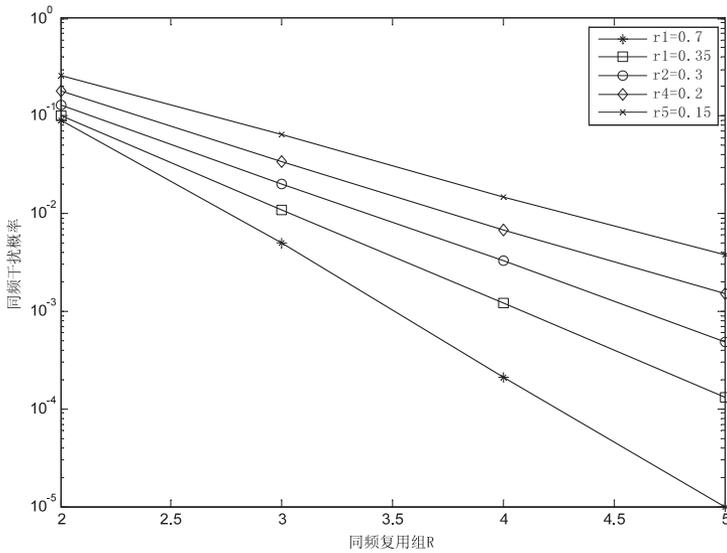


图1 GSM-R 线状蜂窝覆盖同频干扰概率

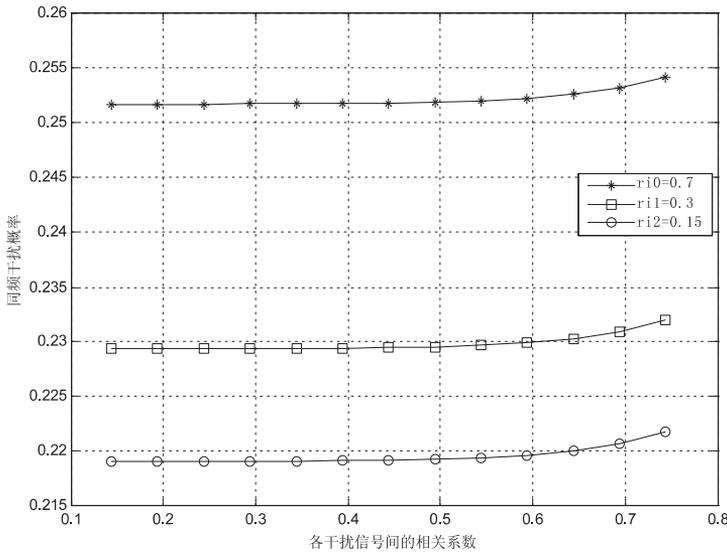


图2 同频干扰信号间相关系数对同频干扰概率的影响

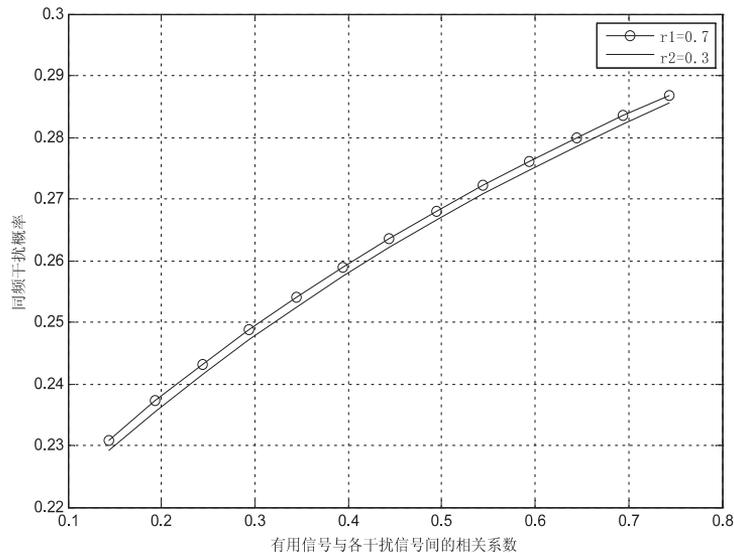


图3 有用信号与干扰信号间相关系数对同频干扰概率的影响

参考文献:

- [1] Jung K, Hong J, Lim J, et al. Co-channel Interference and Coverage Probability of a Pilot Signal in the IS-95 CDMA Channel [C]//Proceedings of 13th International Conference on Advanced Communication Technology. Seoul; IEEE, 2011: 931-936.
- [2] Graziano V. Propagation correlations at 900 MHz [J]. IEEE Trans Veh. Technol., 1987, 27(4): 182-189.
- [3] Sørensen T B. Slow fading cross-correlation versus azimuth separation of base station [J]. Electronic Letters, 1999, 35(2): 127-129.
- [4] Safak A, Prasad R. Effects of Correlated Shadowing Signals on Channel Reuse in Mobile Radio Systems [J]. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 1991, 40(4): 708-713.
- [5] Safak M. Co-channel Interference Probability with Rician-faded and Log-normal Shadowed Correlated Interferers [C]//Proceedings of the Vehicular Technology Conference. Atlanta, GA; IEEE, 1996: 1433-1437.
- [6] Hernandez-Valdez G, Cruz-Perez F A, Lara M. Impact of the Cell Size and the Propagation Model Parameters on the Performance of Microcellular Networks [C]//Proceedings of the 11th IEEE International Symposium on the Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. London; IEEE, 2000: 292-296.
- [7] Wang L C, Lea C T. Co-channel Interference Analysis of Shadowed Rician Channels [J]. Communications Letters, 1998(2): 67-69.
- [8] Fenton L. The sum of log-normal probability distributions in scatter transmission systems [J]. IEEE Trans. on Commun. Systems, 1960, 8(1): 57-67.
- [9] Schwartz S C, Yeh Y S. On the distribution function and moments of power sums with lognormal components [J]. Bell System Tech. J., 1982, 61: 1441-1462.
- [10] Abu-Dayya A A, Beaulieu N C. Outage Probabilities in the Presence of Correlated Lognormal Interferers [J]. IEEE Trans. on Vehicular Technology, 1994, 43: 164-173.
- [11] Rappaport T S. Wireless Communications; Principles and Practice [M]. 2nd ed. 北京: 电子工业出版社, 2006: 55-67.
- [12] 钟章队, 艾渤, 刘秋研, 等. 铁路数字移动通信系统(GSM-R)应用基础理论 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009: 76-112.
- [13] 韩蕾. GSM-R 中同频干扰评定标准的研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2009.

## GSM-R信号相关性对同频干扰性能的影响

作者: [姜立娜](#), [朱刚](#)  
作者单位: [北京交通大学 轨道交通控制与安全国家重点实验室, 北京 100044](#)  
刊名: [计算机技术与发展](#)  
英文刊名: [Computer Technology and Development](#)  
年, 卷(期): 2013(4)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_wjtz201304065.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjtz201304065.aspx)