



基于定向天线的多中继 DF 协作通信系统性能分析

王明伟^{1,2}, 张会生¹, 李立欣¹, 何立风²

(1. 西北工业大学电子信息学院, 陕西 西安 710072;

2. 陕西科技大学电气与信息工程学院, 陕西 西安 710021)

摘要:为提高多中继协作通信系统可靠性,将定向天线和多中继协作通信系统相结合,提出基于定向天线的解码转发最佳中继选择协作策略。首先理论推导出定向发送一定向接收模式下通信系统中断概率闭合表达式,并推导出定向发送—全向接收、全向发送—全向接收模式下的系统中断概率计算式。然后对3种模式下,协作通信系统中断概率和信噪比、中继节点数、天线增益、信道衰落系数以及信道容量之间的关系进行了数值仿真分析。理论分析和仿真结果表明,采用定向天线的协作通信系统可以有效降低协作通信系统中断概率,提高频谱利用率,并且存在最佳中继节点和最优功率分配系数使得中断概率进一步下降。

关键词:协作通信;定向天线;机会中继;中断概率;解码转发

中图分类号:TN914

文献标识码:A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016180

Performance analysis of multi-relay DF cooperative communication system based on directional antenna

WANG Mingwei^{1,2}, ZHANG Huisheng¹, LI Lixin¹, HE Lifeng²

1. School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

2. School of Electrical and Information Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China

Abstract: In order to achieve reliable communication in multi-relay cooperative communication, the directional antenna combining multi-relay cooperative communication system and optimal relay selection decode-and-forward cooperative strategy was presented. Firstly, the theoretical closed form of outage probability of the communication system using directional antenna operating in the three modes of DT-DR, DT-OR and OT-OR were presented. Then for three kinds mode, the collaboration communication system interrupt probability and signal-to-noise ratio, the number of relay nodes, the antenna gain channel fading efficiency and relationship between the channel capacity were analyzed in numerical simulation. These findings reveal that excellent performance of cooperative communication system with directional antennas could be achieved such as smaller outage probability and improved by best relay nodes and optimal power allocation coefficient.

Key words: cooperative communication, directional antenna, optimal relay selection, outage probability, decode-and-forward

收稿日期:2016-02-13;修回日期:2016-06-15

基金项目:中国博士后科学基金资助项目(No.2014M552489);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No.3102014JCQ01052);陕西省科技厅基础研究项目(No.2016JM6062);陕西省咸阳市科技局自然科学基金专项基金资助项目(No.2015K03-17)

Foundation Items: China Postdoctoral Science Foundation Projects (No.2014M552489), The Central University Basic Business Expenses Special Funding for Scientific Research Projects (No.3102014JCQ01052), Natural Science Foundation of Shaanxi Provincial Science and Technology Department(No.2016JM6062), Science and Natural Science Special Projects of Shaanxi Xianyang (No.2015K03-17)



1 引言

协作通信技术通过用户之间彼此共享天线而引入空间分集,有效地对抗无线信道的多径衰落,并带来了系统性能的提升,如信道容量、分集增益、误码特性等。对协作通信技术的研究现已成为无线通信领域的热点之一,但其主要研究方向不考虑天线的方向性和功率增益对传输信号的影响,即基于全向天线模式^[1-3]。现代定向天线的技术研究表明定向天线在功率增益、信号传输距离和指向性等方面优于全向天线。这是因为定向天线电磁波波束具有较小的成形角度,不但能把信号功率更集中地发送到需要通信的方向上,还能减少对非通信方向上的信号干扰,增加了信道的空间复用率。在需要射频隐身的特殊通信场合,如军事领域,采用定向天线可以避免信号被侦听与干扰,较好地实现了射频隐身的目的^[4]。随着定向天线的制造与应用技术的发展,现代定向天线朝着智能化和小型化方向发展,这使其应用领域更加广阔。正是因为定向天线的这些优点,已有诸多学者对此进行了研究,形成了较为完整的定向天线理论和定向天线通信系统,如 Kim E、Redi J 等人研究了定向天线在 Ad Hoc 网络中的应用^[5,6],Nadeem T 等人研究了定向天线在无线网络中的应用^[7]。

关于协作通信和定向天线的单方面研究很多,但将定向天线和协作通信系统结合起来的研究基本上还处于起步阶段。参考文献[4,8]指出,采用定向天线三节点协作通信单中继节点解码转发(decode-and-forward relaying, DF)和放大转发(amplify-and-forward, AF)策略的协作通信系统,可以有效降低 BPSK 系统误码率(SER);参考文献[9,10]推导出双向单中继 AF、多中继 AF 协作通信系统中中断概率的上下界,说明采用定向天线可以有效降低系统中中断概率。

本文对定向天线技术应用于协作通信系统进行了进一步探索性研究。以采用定向天线的多中继 DF 协作通信系统为研究对象,在传统选择式信号合并(selection combining, SC)的基础上提出最佳中继选择协作策略。从理论上推导了协作通信系统中中断概率,并进行了仿真验证和分析。为实现仿真环境更加接近于实际信道衰落环境而更具一般性,提出了服从瑞利衰落的等分指数衰减信道模型。结论表明,采用定向天线可以有效提升协作通信系统的传输性能。

2 系统模型

2.1 定向天线模型

根据天线方向性的不同,天线分为全向和定向两种^[11]。全向天线向全空域各个角度都辐射电磁波,通信距离近,增益小,多应用于小范围通信。定向天线一般应用于通信距离远,功率增益明显的通信系统。假设通信系统收发端均采用定向天线,则该通信系统收发端的功率关系可用方程描述为:

$$P_R = \frac{G_T G_R}{\alpha d^r} P_T \quad (1)$$

其中, P_T 表示发射功率。 α 为损耗常数, r 为路径衰减因子,一般取 $2 \leq r \leq 4$ 。 G_T 表示发射端的定向天线增益,是指天线在某个范围内(由方位角和仰角决定)发射的辐射能量的一个度量, G_R 表示接收端的定向天线增益,是天线在该区域内收集到的辐射能量的一个度量。式(1)也称为基本链路预算(link budget)方程。方程说明了采用定向天线时,无线链路传输特性接收功率和发射功率之间的关系。若 $G_T = G_R = 0$ dB,定向天线退化为全向天线,对信号功率没有增强。天线增益因子 G_T 和 G_R 在实际中约为 15 dB。

2.2 多中继协作策略

假设定向天线波束指向具有小的成形角度,某个时刻单个节点无法实现全区域的广播通信,仅能覆盖某一方向上的节点,因此需要在源节点和目的节点采用多根定向天线实现全空域覆盖。假设在中继节点密度不大时,考虑一个采用定向天线的多中继节点的半双工双跳模型,如图 1 所示。基于实际通信环境,源节点和目的节点由于障碍物的阻挡没有直接通信的可能,中继节点分布于障碍物周围且能够和源节点、目的节点直接通信。也就是说,源节点 S 只能通过中继节点 R 向目的节点 D 发送信息。源节点采用多个定向发送天线,中继节点采用定向发送一定向接收天线,目的节点采用定向接收天线。考虑到采用最佳中继转发,信息传输过程中有 K 个中继, $S_{\text{relay}} = \{1, 2, \dots, K\}$ 。协作通信过程具体描述为源节点到目的节点一次传输过程包含两个阶段:第一阶段,源节点向中继节点定向发送信息,中继节点对来自源节点的信息定向接收并进行解码;第二阶段,从所有正确解码的中继节点中选择最佳中继,仅由该节点采用定向方式向目的节点转发信息,目的节点定向接收。该策略不同于传统选择合并(selection combining, SC)策略,当最佳中继被选中后,其他中继节点不再转发信息,保持静默,节省了功率。

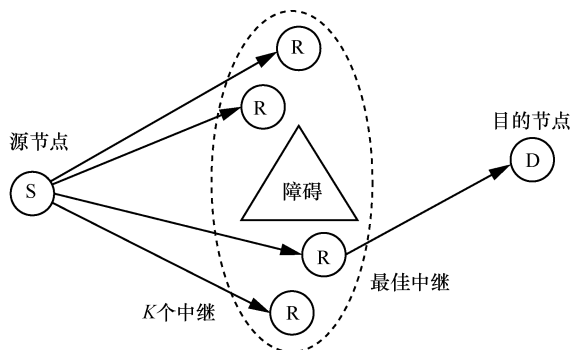


图1 多中继协作通信示意

假设协作通信系统无线传输的信道特性服从准静态瑞利平坦衰落 (quasi-static flat Rayleigh fading), 信道信息已知, 且在一次传输中保持不变。对于任意两个通信节点 A 和 B, 信道状态 h_{AB} 统计特性已知, 如果存在一次 A 到 B 的传输链路 $A \rightarrow B$, 节点 B 的接收信号可以表示为:

$$y_B = h_{AB}x_A + n_B \quad (2)$$

其中, $n_B \sim \text{CN}(0, N_0)$ 为节点 B 的附加高斯白噪声 (additive Gaussian white noise, AWGN)。 x_A 是节点 A 的发射信号。 h_{AB} 为节点 A、B 之间的信道增益 (衰落幅值), 为一个随机变量, 满足瑞利衰落, 其均方值为 Ω_{AB} 。设信道功率增益 $\eta \triangleq |h_{AB}|^2$, 则其概率密度函数 PDF 服从指数分布 $\eta \sim \gamma(1/\Omega_{AB})$, 即:

$$p_{AB} = \frac{1}{\Omega_{AB}} \exp(-\eta/\Omega_{AB}), \eta \geq 0 \quad (3)$$

若 A 是源节点, 那么 $E\{|x_A|^2\} = P_S$ 。同样, 若 A 为第 k 个中继, 那么 $E\{|x_A|^2\} = P_k$ 。源节点 S 到中继节点 k 的 $S \rightarrow k$ 链路以及中继节点 k 到目的节点 D 的 $k \rightarrow D$ 链路的接收信号平均信噪比为 $\gamma_{Sk} = \Omega_{Sk}P_S/N_0$ 和 $\gamma_{kD} = \Omega_{kD}P_k/N_0$ 。结合式(1)和式(2), 得到定向天线的协作通信系统模型一般表达式为:

$$y_B = \alpha_{AB}x_A + n_B \quad (4)$$

其中, $\alpha_{AB} = \sqrt{G_T G_R} h_{AB}$, 定义为包含定向天线增益的信道增益, 则 $\eta'_{AB} \triangleq |\alpha_{AB}|^2 = G_T G_R |h_{AB}|^2$, 满足指数分布 $\eta'_{AB} \sim \gamma(1/\Omega'_{AB})$, 其中, 参数 $\Omega'_{AB} = G_T G_R \Omega_{AB}$ 。平均接收信噪比分别为 $\gamma'_{Sk} = \Omega'_{Sk}P_S/N_0$ 和 $\gamma'_{kD} = \Omega'_{kD}P_k/N_0$ 。

3 性能分析

由于定向天线不存在信号广播, 源节点配置多个定向天线覆盖对应的 K 个中继节点。为了达到与采用全向天线

直接传输相同的频谱效率为 R bit/s, 采用了 2 个时隙进行传输的协作通信策略, 源节点到中继节点不发生中断的条件为:

$$\text{lb}\left(1 + \frac{\zeta}{K} \eta'_{Sk} \text{SNR}\right) \leq 2R \quad (5)$$

其中, $\text{SNR} = P_{\text{total}}/N_0$, η'_{Sk} 为信道功率增益系数, $\eta'_{Sk} = G_T G_R |h_{Sk}|^2$ 。源节点功率满足如下约束条件:

$$P_{\text{source}} = \zeta P_{\text{total}} \quad (6)$$

其中, P_{total} 为系统传输总功率, ζ 为总功率分配给源节点的功率分配系数, 且 $\zeta \in (0, 1]$, $1 - \zeta \in [0, 1)$ 。源节点到一个中继节点通信使用功率 P_{source}/K 。中继满足功率约束条件:

$$P_{\text{relay}} = (1 - \zeta) P_{\text{total}} \quad (7)$$

其中, K 为中继的个数, P_{source} 为源节点发射功率, P_{relay} 为中继节点总功率。对于包含 K 个中继节点的集合 S_{relay} , 满足式(5)才能够正确解码, 因此协作通信信息传输中的第一阶段源节点到中继节点不会发生中断事件的中继构成集合 D_l 为:

$$D_l \triangleq \left\{ l \in S_{\text{relay}} : \text{lb}\left(1 + \frac{\zeta}{K} \eta'_{Sl} \text{SNR}\right) \geq 2R \right\} \quad (8)$$

设 $D_l \subseteq S_{\text{relay}}$, l 为子集基数。 l 不为零, 表示存在源节点到中继节点不发生中断的信号传输链路, 中继节点能够正确解码。在协作通信信息传输的第一阶段不发生中断的概率为:

$$\begin{aligned} P_r\{D_l\} &= \prod_{i \in D_l} P_r\{\eta'_{Si} \geq k_i\} \prod_{j \notin D_l} P_r\{\eta'_{Sj} < k_j\} \\ &= \prod_{i \in D_l} e^{-\frac{k_i}{\Omega'_{Si}}} \prod_{j \notin D_l} (1 - e^{-\frac{k_j}{\Omega'_{Sj}}}) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\text{其中, } k_i = K \frac{2^{2R} - 1}{\zeta \text{SNR}}, \Omega'_{Si} = G_T G_R \Omega_{Si}, \Omega'_{Sj} = G_T G_R \Omega_{Sj}。$$

在协作通信信息传输的第二阶段, 若中继节点到目的节点通信不发生中断, 至少存在一个中继节点能够成功进行信号解码转发, 目的节点成功完成接收和解码, 否则协作系统发生中断事件。多中继节点 DF 协作通信系统总的中断概率为:

$$P_{\text{MR-DF}}(\text{outage}) = \sum_{l=0}^K \sum_{D_l} P_r\{\text{outage}|D_l\} P_r\{D_l\} \quad (10)$$

其遍历了能正确解码的 l 个中继节点组成的 C_K^l 个子集。 $P_r\{\text{outage}|D_l\}$ 为中继 k 到目的节点 D 的通信链路发生中断的条件概率, 为:



$$\begin{aligned}
& P_r\{\text{outage} | D_l\} \\
&= P_r\{\text{lb}(1 + (1 - \zeta) \text{SNR} \cdot \max_{k \in D_l} \eta'_{kd}) < 2R\} \\
&= \prod_{k \in D_l} P_r\{\gamma'_{kd} < k_2\} \\
&= \prod_{k \in D_l} (1 - e^{-\frac{k_2}{\Omega'_{kd}}}) \quad (11)
\end{aligned}$$

其中, $k_2 = \frac{2^{2R}-1}{(1-\zeta)\text{SNR}}$ 。对于 $k \in D_l$, $\eta'_{kd} = G_T G_R |h_{kd}|^2$, $\Omega'_{kd} =$

$G_T G_R \Omega_{kd} \max_{k \in D_l} \eta'_{kd}$ 为中继解码转发中选择的最佳中继条件。

结合式(9)、式(10)和式(11),按照最佳中继选择思想,采用定向天线和最佳中继选择的多中继 DF(MR-DF)协作通信系统中断概率为:

$$\begin{aligned}
& P_{\text{MR-DF}}(\text{outage}) \\
&= \sum_{l=0}^K \sum_{D_l} P_r\{\text{outage} | D_k(l)\} P_r\{D_k(l)\} \\
&= \sum_{l=0}^K \sum_{D_l} \left[\prod_{i \in D_l} (1 - e^{-\frac{k_2}{\Omega'_{di}}}) \prod_{i \in D_l} e^{-\frac{k_1}{\Omega'_{di}}} \prod_{j \notin D_l} (1 - e^{-\frac{k_1}{\Omega'_{dj}}}) \right] \\
&= \sum_{l=0}^K \sum_{D_l} \left[\prod_{i \in D_l} e^{-\frac{k_1}{\Omega'_{di}}} (1 - e^{-\frac{k_2}{\Omega'_{di}}}) \prod_{j \notin D_l} (1 - e^{-\frac{k_1}{\Omega'_{dj}}}) \right] \quad (12)
\end{aligned}$$

利用等式:

$$\begin{aligned}
& \sum_{l=0}^K \sum_{D_l \subseteq \{1, 2, \dots, K\}} \left[\prod_{i \in D_l} a_k (1 - b_k) \prod_{i \notin D_l} (1 - a_k) \right] \\
&= \prod_{k=1}^K [a_k (1 - b_k) + (1 - a_k)] = \prod_{k=1}^K (1 - a_k b_k) \quad (13)
\end{aligned}$$

化简式(13)为:

$$P_{\text{MR-DF}}(\text{outage}) = \prod_{k=1}^K \left[1 - e^{-\frac{k_1}{\Omega'_{dk}}} e^{-\frac{k_2}{\Omega'_{kd}}} \right] \quad (14)$$

将 $k_1 = K \frac{2^{2R}-1}{\zeta \text{SNR}}$ 和 $k_2 = \frac{2^{2R}-1}{(1-\zeta)\text{SNR}}$ 带入式(14),推导出 DT-DR

模式下的最佳中继选择协作通信系统的中断概率为:

$$\begin{aligned}
& P_{\text{DT-DR}}(\text{outage}) \\
&= \prod_{k=1}^K \left[1 - e^{-\left(\frac{2^{2R}-1}{G_T G_R \text{SNR}} \right) \left(\frac{K}{\zeta \Omega_{dk}} + \frac{1}{(1-\zeta) \Omega_{kd}} \right)} \right] \quad (15)
\end{aligned}$$

若源节点、中继节点和目的节点均采用定向发送—全向接收,天线增益 $G_T \neq 0$ dB, $G_R = 0$ dB,此时系统中断概率为:

$$\begin{aligned}
& P_{\text{DT-OR}}(\text{outage}) \\
&= \prod_{k=1}^K \left[1 - e^{-\left(\frac{2^{2R}-1}{G_T \text{SNR}} \right) \left(\frac{K}{\zeta \Omega_{dk}} + \frac{1}{(1-\zeta) \Omega_{kd}} \right)} \right] \quad (16)
\end{aligned}$$

若源节点、中继节点和目的节点均采用全向发送—全向接收,天线增益 $G_T = 0$ dB, $G_R = 0$ dB,为保证比较的公平性,源节点全向天线发送功率为定向天线的 K 倍,中断概率为:

$$\begin{aligned}
& P_{\text{OT-OR}}(\text{outage}) \\
&= \prod_{k=1}^K \left[1 - e^{-\left(\frac{2^{2R}-1}{\text{SNR}} \right) \left(\frac{1}{\zeta \Omega_{dk}} + \frac{1}{(1-\zeta) \Omega_{kd}} \right)} \right] \quad (17)
\end{aligned}$$

从式(15)~式(17)的理论分析结果,可以看到基于定向天线和机会中继的多中继节点协作通信亦可以获得满分散增益。

4 仿真与分析

为使仿真环境接近实际信道衰落环境,提出信道衰落假设满足等分指数衰减,即 $\Omega_{sk} = \Omega_{s1} e^{-(k-1)\delta_1}$ 及 $\Omega_{kd} = \Omega_{d1} e^{-(k-1)\delta_2}$, $\delta_1 = \delta_2 = \delta \geq 0$, $k=1, 2, \dots, K$, δ_1 和 δ_2 分别为源节点到中继和中继到目的节点链路功率衰减系数,描述不同信道衰落程度。设 $\Omega_{s1} = \Omega_{d1} = 1$ 为信道平均功率衰减系数参考值。

图2显示在设定的信道、中继节点个数及功率分配条件下 DT-DR、DT-OR 和 OT-OR 协作通信系统中中断概率和信噪比之间关系的比较曲线。仿真设定条件:频谱效率 $R=1$ bit/(s·Hz);源节点和最佳中继节点等功率分配 $\zeta=0.5$; $\delta_1 = \delta_2 = \delta$, $\delta=0, 0.5, 1$;定向天线增益 $G_T=15$ dB, $G_R=15$ dB。作为例子,任意中继节点数 $K=4$ 。图2显示随着信噪比的增加系统误码率迅速下降,且对应曲线斜率基本一致,说明增加系统信噪比有利于系统性能的改善。从图2可看出在上述假设条件下 DT-DR 系统性能优于 DT-OR 系统性能,优于 OT-OR 系统性能。尤其 DT-DR 协作通信系统在小信噪比的情况下体现出很好的性能,适合于传输功率小或信道衰落大的环境,图2中显示在相同的中断概率(如 $P_{\text{outage}}=10^{-4}$)情况下,DT-DR 协作通信系统相比 DT-OR 协作通信所需功率减少 15 dB,DT-OR 协作通信系统相比 OT-OR 协作通信系统所需功率减少 12 dB,性能改善是相当可观的。这种性能改善的主要原因是引入了定向天线功率增益。

图3显示了中断概率和定向发射天线增益之间的关系。设 DT-DR 系统天线增益 $G_T=G_R=G$,系统工作在小信噪比环境 $\text{SNR}=5$ dB,中继节点数 $K=4$, $\zeta=5$,频谱效率 $R=1$ bit/(s·Hz)。其他信道条件设置 $\Omega_{s1}=\Omega_{d1}=1$, $\delta_1=\delta_2=\delta$, $\delta=0, 0.5, 1$ 。图3显示,随着定向天线增益的增加,DT-DR 系统误码率随之下降。这是因为各节点的天线增益可以有效提高各节点的接收功率和信噪比。

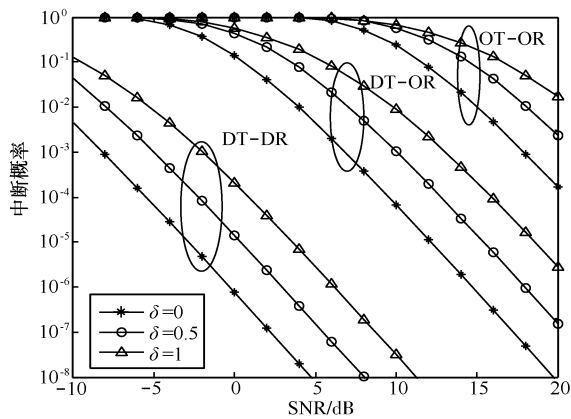


图2 中断概率和信噪比关系

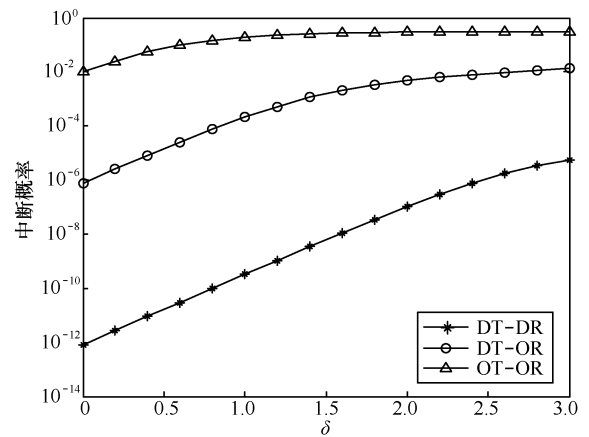


图4 中断概率和信道衰落系数关系

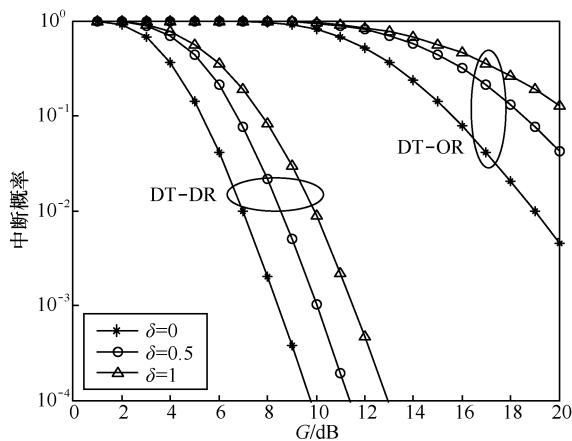


图3 中断概率和定向天线增益之间的关系

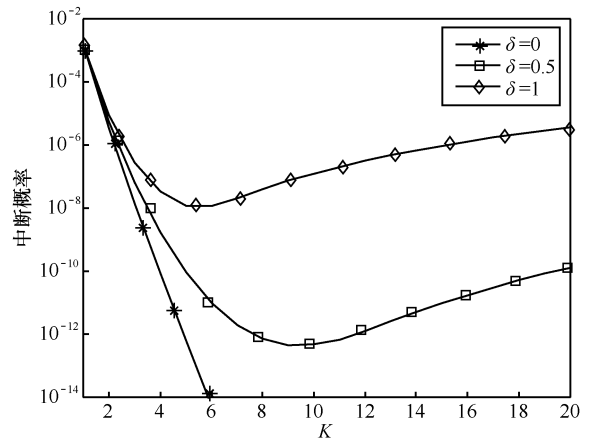


图5 DT-DR 系统中中断概率和中继节点数关系

图4显示协作通信系统性能在不同信道环境下DT-DR、DT-OR和OT-OR协作通信系统性能分析和比较。不失一般性,设置仿真参数 $\delta_1=\delta_2=\delta$ 。对于DT-DR,设天线增益 $G_T=15$ dB, $G_R=15$ dB。对于DT-OR, $G_T=15$ dB, $G_R=0$ dB; $SNR=15$ dB, $K=4$; $\zeta=0.5$ 。从图4可以看出,DT-DR协作通信系统在不同的信道环境,尤其是深衰落信道环境,系统性能仍可满足通信要求,而OT-OR通信系统能正常工作需要较好的信道环境。

图5显示DT-DR系统中中断概率在信道分布参数($\delta=0, 0.5, 1$)条件下与中继节点的个数关系。设定仿真条件为功率分配系数 $\zeta=0.5$, 频谱效率 $R=1$ bit/(s·Hz)。天线增益 $G_T=15$ dB, $G_R=15$ dB, 弱信号条件 $SNR=10$ dB。从图5可以看出,DT-DR协作通信系统的性能和节点数之间的关系为一下凸函数关系,存在最佳中继数 K^* ,在中继数大于 K^* 时,DT-DR系统性能逐渐降低,说明定向天线带来的增益已经不能够补偿源节点采用多根定向天线的功率损耗。结合式(15)进行分析,最佳中继数 K^* 和信噪比、信道衰落环

境有关。DT-OR系统可以得到类似结论。

图6显示在不同信道环境下($\delta=0, 0.5, 1$),DT-DR、DT-OR与OT-OR协作通信系统在 $K=4$, $SNR=5$ dB, $\zeta=0.5$ 的条件下,中断概率和频谱效率之间的关系。由图6中可以看出,即使在小信噪比和深衰落信道环境下,采用定向天线可以有效提高系统频谱效率。

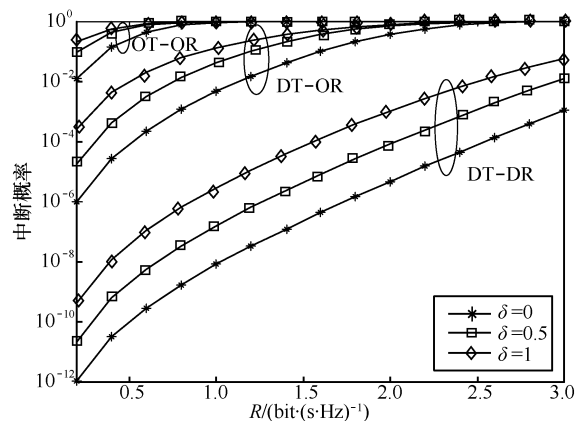


图6 中断概率和频谱效率关系

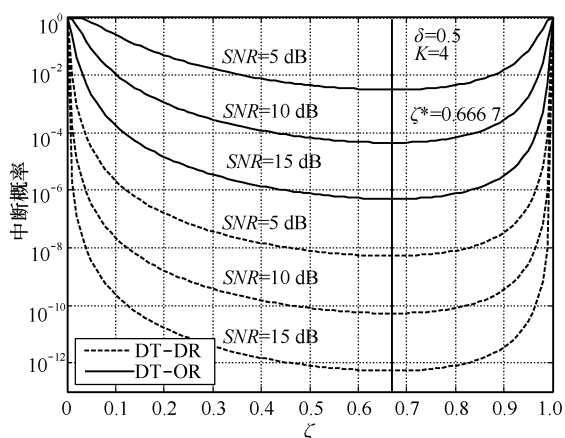


图7显示了DT-DR和DT-OR协作通信系统中断概率和功率分配系数 ζ 之间的关系。定向天线增益设置为 $G_T=15$ dB, $G_R=15$ dB。图7(a)设置仿真参数为 $\delta=0.5, K=4$, $SNR=5$ dB, 10 dB, 15 dB。图7(b)设置仿真参数为 $\delta=1$, 其他同图7(a)。图7(c)设置仿真参数为 $\delta=0.5$, 节点数 $K=4, 12$; $SNR=15$ dB。为和OT-OR进行比较, 图7(d)设置 $\delta=0.5, 1$; $K=4, 12$; $SNR=20$ dB, 25 dB。从图7(d)可以得出, 对于OT-OR协作通信系统, 源节点和中继节点按照等功率分配 $\zeta^*=0.5$ 是最优的, 与中继节点数、SNR和信道衰落系数无关。从图7(a)、图7(b)、图7(c)看到DT-DR协作通信系统, 为获得最好系统性能, 选择的最佳功率分配系数 ζ^* 与系统SNR、天线增益 G_T 和 G_R 、信道衰减系数 δ 无关, 只与中继节点数 K 有关, 并且随着中继节点数 K 的增加而偏大, 即对于DT-DR协作通信系统, 源节点的发射功率 P_{source} 与总功率 P_{total} 的比值 ζ 大于1/2且小于1, 而最佳中继节点的最优功率 P_{relay} 与总功率 P_{total} 的比值 $1-\zeta$ 大于0且小于1/2。这就意味着, 对于DT-DR协作通信系统, 应该始终把更多

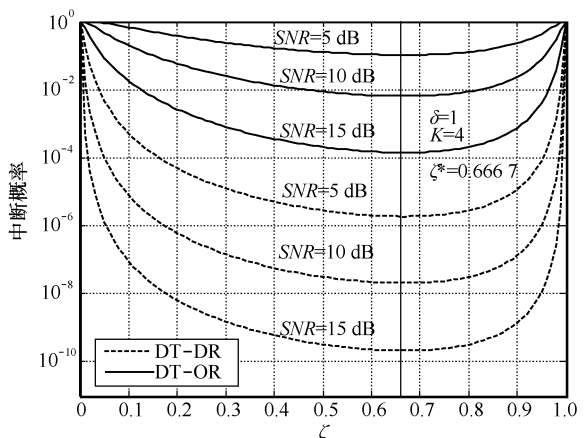
的功率分配给源节点, 较少的功率分配给中继。这是因为在采用定向天线的情况下, 随着中继节点数的增加, 源节点需要利用更多的时隙, 消耗更多的功率进行发送, 为了获得期望的协作分集性能, 源节点到中继节点的链路和中继节点到目的节点链路应该进行合理的平衡, 以保证中继正确译码。同时, 也说明若中继节点不能正确译码, 则中继节点转发的功能就不那么重要了, 给源节点分配更多地功率就显得合理。

5 结束语

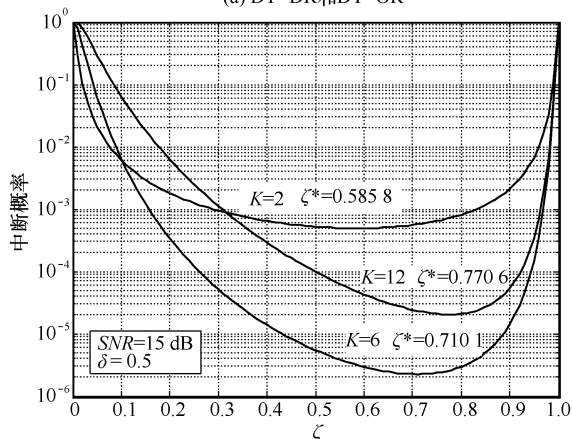
提出了定向天线结合最佳中继选择策略协作通信系统, 推导出采用定向天线DT-DR系统中断概率闭合表达式, 进一步推导出DT-OR与OT-OR的中断概率公式。结论表明, 定向天线有利于降低最佳中继选择协作通信系统中断概率, 提高频谱效率, 适合小信噪比和深衰落信道环境下的可靠通信。DT-DR协作通信系统存在最佳中继节点数, 使得系统性能最优。分析结果同时表明, 当中继节点



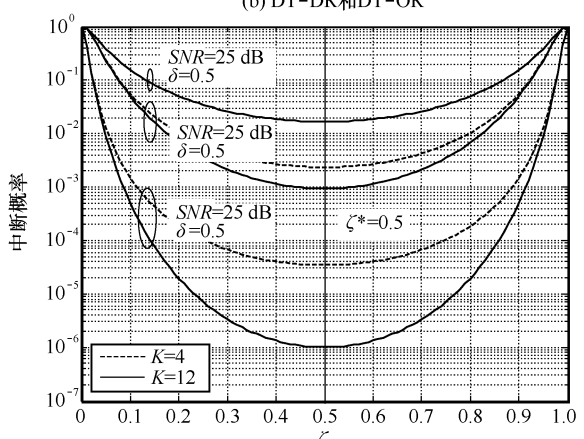
(a) DT-DR和DT-OR



(b) DT-DR和DT-OR



(c) DT-DR



(d) DT-OR

图7 中断概率和最优功率分配系数之间的关系

数给定时,源节点和中继节点采用不等功率分配,可以进一步降低系统中断概率。分配系数只与中继节点数有关而与信噪比、天线增益、信道衰落环境无关。

总之,基于定向天线和最佳中继选择 DF 协作通信系统在提供系统分集增益的同时增加了信道容量,降低了中断概率,有效节省系统传输功率,因而其有着广阔的应用空间。

参考文献:

- [1] DING M, LUO H. Multi-point cooperative communication systems: theory and applications [J]. Signals & Communication Technology, 2013, 27(4): 765-767.
- [2] RAY K, LIU J, AHMED S, et al. Cooperative communications and networking[M]. London: Cambridge University Press, 2010.
- [3] ZHUANG W, ISMAIL M. Cooperation in wireless communication networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2012, 19(2): 10-20.
- [4] 檀蕊莲, 柏鹏, 李哲, 等. 基于定向天线的 DF 协作通信系统 SER 性能分析[J]. 系统工程与电子技术, 2014(6): 1185-1190.
- TAN R L, BAI P, LI Z, et al. Performance analysis of SER in DF cooperative communication system based on directional antenna[J]. Systems Engineering and Electronics, 2014(6): 1185-1190.
- [5] KIM E, YOUM S. Selective cooperative transmission in Ad Hoc networks with directional antennas [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2013, 43(1): 51-55.
- [6] RAMANATHAN R, REDDI J, SANTIVANEZ C, et al. Ad hoc networking with directional antennas: a complete system solution[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(3): 496-506.
- [7] NADEEM T. Analysis and enhancements for IEEE 802.11 networks using directional antenna with opportunistic mechanisms [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(6): 3012-3024.
- [8] TAN R L. Performance analysis of directional cooperative communication system[J]. International Conference on Computer, Communications and Information Technology, 2014: 362-365.
- [9] 王徐华, 柏鹏, 李明阳, 等. 基于定向天线的多中继节点的 AF 协同通信系统性能研究[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(3): 624-628.
- WANG X H, BAI P, LI M Y, et al. Performance analysis of multi-relays AF cooperative communication system based on

directional antenna [J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(3): 624-628.

- [10] 王徐华, 柏鹏, 李明阳. 定向天线的双向单中继 AF 协同通信技术[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2013, 14(2): 56-60.
- WANG X H, BAI P, LI M Y, et al. Research on bidirectional single relay AF cooperative communication technology based on directional antenna [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2013, 14(2): 56-60.
- [11] HAYKIN S S, MOHER M. Modern wireless communication[M]. New Jersey: Prentice Hall, 2004: 9-13.

[作者简介]



王明伟(1976-),男,西北工业大学电子信息学院博士生,陕西科技大学电气与信息工程学院副教授,主要研究方向为无线协作通信。



张会生(1955-),男,西北工业大学电子信息学院教授、博士生导师,主要研究方向为通信系统理论与技术、多媒体通信与组网技术。



李立欣(1979-),男,博士,西北工业大学电子信息学院副教授、硕士生导师,主要研究方向为通信与信息系统。



何立风(1963-),男,博士,陕西科技大学电气与信息工程学院教授、博士生导师,主要研究方向为信号处理。