

УДК 621.391.812

АНАЛИЗ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ ОТ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ОБЪЕКТА НА НАЗЕМНЫЙ ПУНКТ ПРИЕМА

Паршин Ю.Н., д.т.н., проф., заведующий кафедрой «Радиотехнические устройства» РГРТУ, e-mail: parshin.y.n@rsreu.ru;

Гусев С.И., к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник РГРТУ, e-mail: s.i.gusev@inbox.ru;

Колесников С.В., старший преподаватель кафедры «Радиотехнические устройства» РГРТУ, e-mail: sergey_v.k@mail.ru.

HIGH RATE COMMUNICATION SYSTEM FOR TRANSFERRING DATA FROM ROTATING OBJECT TO GROUND RECEIVING POINT

Parshin Yu. N., Gusev S.I., Kolesnikov S.V.

The paper discusses the design options of a system for data transmission from a rotating object – airborne vehicle or spacecraft to the ground receiving station with various spatial antenna structures: SISO, SIMO, MISO, MIMO. Different variants of the onboard antenna system with a different number and spatial structure of antennas are investigated. Individual antenna directivity pattern and antenna system directivity patterns are calculated. Values of the channel matrix for the communication system for the aircraft rotating around the longitudinal axis are calculated. Transmission rate averaged over the period of rotation according to the position of the aircraft on the trajectory and spatial structure of the ground receiving station is calculated. Questions of technical implementation of communication system with different spatial structure are discussed.

Key words: high rate communication system, rotating object, structure of antennas, ground receiving point, MIMO.

Ключевые слова: высокоскоростная связь, пропускная способность, вращающийся летательный аппарат, антенная система, диаграмма направленности, MIMO.

Введение

Построение высокоскоростной систем передачи информации от вращающегося объекта и решение различных исследовательских задач на его борту требует создания высокоскоростной системы передачи информации на наземный пункт приема [1, 7]. Особенностью условий функционирования аппаратуры передачи информации для некоторых типов носителей исследовательской аппаратуры является быстрое вращение объекта вокруг продольной оси, создаваемое с целью стабилизации летательного аппарата при движении по всей траектории полета. Также при движении объекта изменяется ориентация относительно наземного пункта приема. Все это усложняет работу системы передачи информации, требует согласования направленных свойств бортовой и наземной антенных систем с характером движения объекта, учета влияния изменения их взаимной ориентации на пропускную способность канала передачи информации.

В работе [7] излагаются проблемы, связанные с изменением ориентации объекта относительно наземного пункта приема, что приводит к снижению эффективности передачи информации. Эффект затенения антенны корпусом объекта при его вращении может привести даже к прерыванию передачи информации. Для повышения надежности работы используются несколько наземных

Исследованы варианты построения систем передачи информации от вращающегося объекта на наземный пункт приема с различными пространственными структурами антенн: SISO, SIMO, MISO, MIMO. Рассмотрены варианты построения бортовой антенной системы с различным числом антенн. Рассчитаны значения канальной матрицы на траектории движения летательного аппарата с учетом его вращения вокруг продольной оси. На основе точных значений канальных матриц рассчитана усредненная за период вращения пропускная способность системы передачи информации в зависимости от пространственной структуры наземного пункта приема. Особое внимание уделено влиянию пространственной структуры приемных и передающих антенн на пропускную способность. Рассмотрены вопросы технической реализации систем передачи информации с различной пространственной структурой.

пунктов приема, что приводит к значительным затратам.

В данной статье для повышения качества передачи информации используется MIMO технология передачи информации [5], получившая широкое распространение в мобильных системах передачи информации. Особенностью рассматриваемой задачи является наличие нескольких антенн на борту вращающегося объекта для передачи информации на наземный пункт приема. Поэтому актуальной задачей является оптимизация передающей части системы, что можно реализовать путем пространственно-временного кодирования [5,6].

Целью работы является получение предельных значений пропускной способности системы передачи информации от вращающегося объекта при различных пространственных структурах антенных систем и разработка рекомендаций по технической реализации исследуемой системы.

Постановка задачи

Пусть ось вращения объекта перпендикулярна плоскости расположения приемных пунктов. Вращение объекта производится с некоторой угловой скоростью Ω . Передающие антенны располагаются на поверхности объекта, имеющего вид цилиндра радиусом r , равномерно по окружности, угловые координаты антенн $\gamma_{Tm} = 2\pi(m-1)/N_T$, $m=1, \dots, N_T$ (рис. 1). Приемные антенны расположены в плоскости вращения объекта по дуге радиуса R равномерно в угловом секторе $\Delta\gamma_R$, угловые координаты антенн $\gamma_{Rn} = \Delta\gamma_R(n-1)/N_R$, $n=1, \dots, N_R$.

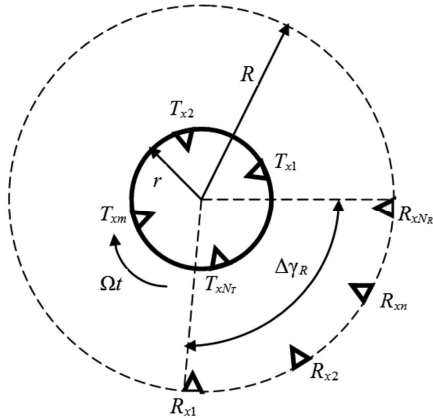


Рис. 1. Пространственное расположение передающих и приемных антенн

Направленные свойства передающих антенн определяются типом излучателей, расположением на поверхности цилиндра, влиянием растекания токов по поверхности цилиндра, а также взаимным влиянием излучателей [3, 7]. В простейшем случае можно считать, что корпус объекта полностью затеняет антенну, а диаграмма направленности излучателей передающей антенны в плоскости вращения задается выражением

$$D(\gamma) = \begin{cases} \cos \gamma, & \cos \gamma > 0 \\ 0, & \cos \gamma < 0 \end{cases}$$

При вращении ориентация m -й передающей антенны относительно n -й приемной антенны определяется углом поворота объекта и угловыми положениями передающей антенны на объекте и приемной антенны на местности: $\gamma_{nm} = \Omega t + \gamma_{Tm} - \gamma_{Rn}$. Коэффициенты канальной матрицы определяются в предположении прямой видимости между приемными и передающими антеннами и зависят от ориентации передающих антенн в направлении приемных антенн, а также от расстояния между фазовыми центрами R_{nm} каждой пары m -й передающей и n -й приемной антенн. Полагая, что $R_{nm} \gg r$ и изменение расстояния между антеннами при вращении объекта практически не влияет на амплитуду принимаемого сигнала, запишем канальный коэффициент в виде:

$$H_{nm} = D(\gamma_{nm}) e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} R_{nm}},$$

$$\text{где } R_{nm} = \sqrt{(R \cos \gamma_{Rn} - r \cos(\Omega t + \gamma_{Tm}))^2 + (R \sin \gamma_{Rn} - r \sin(\Omega t + \gamma_{Tm}))^2}.$$

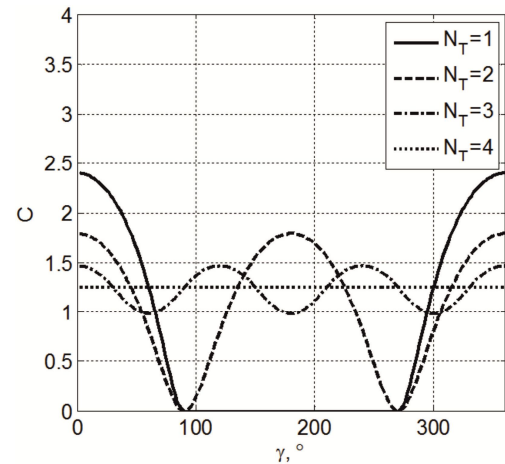
Пропускная способность канала передачи информации определяется выражением [5]:

$$C = \log_2 \det \left(\mathbf{I}_{N_R} + \frac{q}{N_T} \mathbf{H} \mathbf{H}^H \right), \text{ бит/символ,} \quad (1)$$

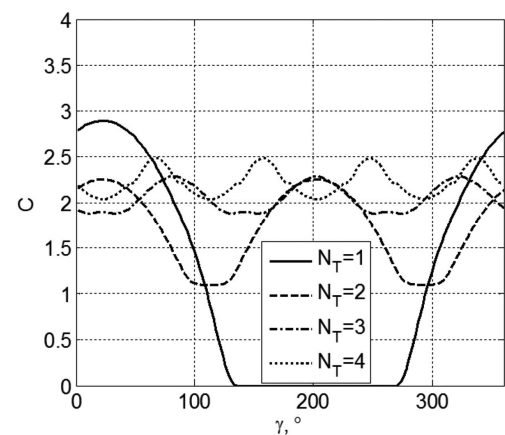
где \mathbf{I}_{N_R} – единичная диагональная матрица размерностью N_R , $q = D_X / D_N$ – энергетический потенциал системы, равный отношению мощности сигнала, излучаемой всеми передающими антеннами D_X , к мощности шума в каждой приемной антенне D_N , $\mathbf{H} = \{H_{nm}, n=1, \dots, N_R, m=1, \dots, N_T\}$ – матрица канальных коэффициентов.

Результаты анализа пропускной способности

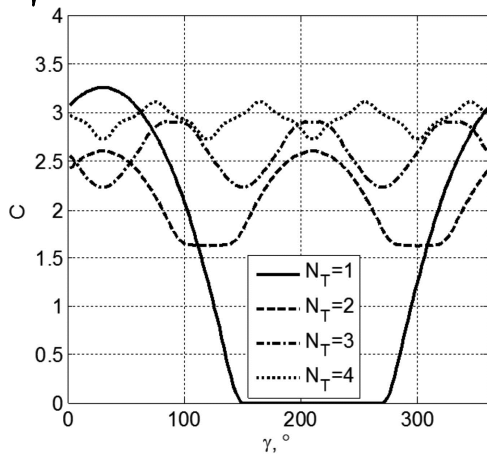
На рис. 2 а, 2 б, 2 в, 2 г приведены зависимости пропускной способности системы передачи информации от угла поворота летательного объекта по оси вращения за время, равное периоду вращения объекта, при различном числе приемных N_R , передающих антенн N_T и $R = 10^6 \lambda$, $r = 5 \lambda$ и расположении приемных антенн в секторе $\Delta\gamma_R = \pi/2$.



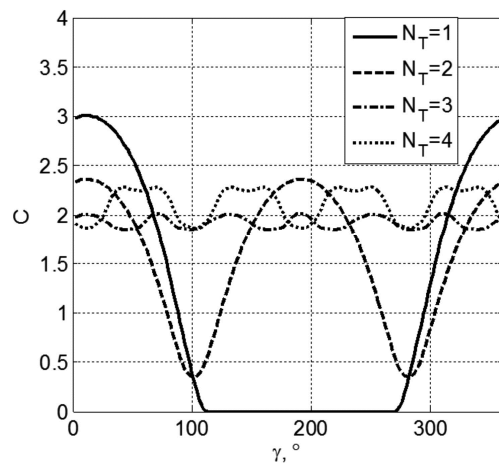
а)



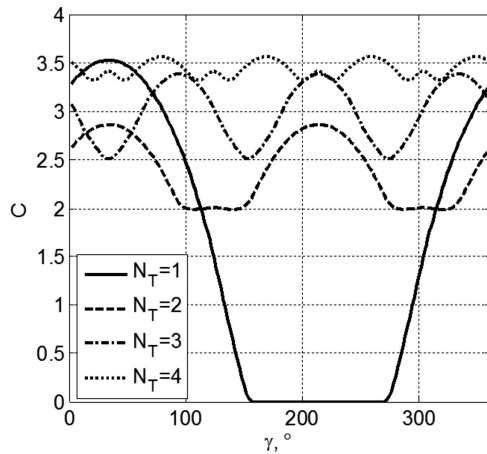
б)



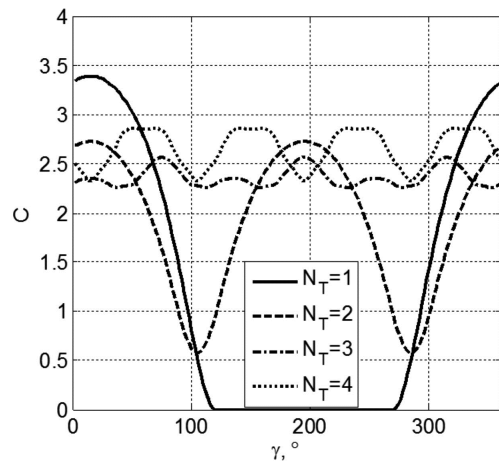
а)



б)



в)



г)

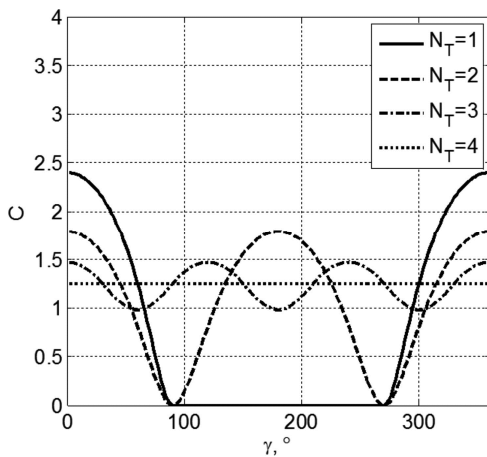
Рис. 2. Пропускная способность системы

передачи информации $\Delta\gamma_R = \pi/2$ а) $N_R = 1$; б) $N_R = 2$;

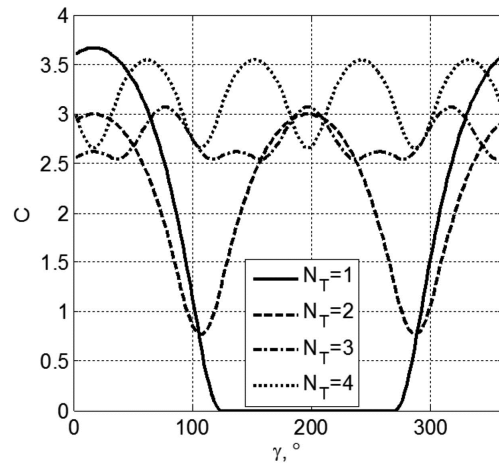
в) $N_R = 3$; г) $N_R = 4$

На рис. 3 а, 3 б, 3 в, 3 г приведены зависимости пропускной способности от угла поворота летательного объекта по оси вращения за время, равное периоду вращения объекта, при различном числе приемных N_R и передающих антенн N_T , $R = 10^6 \lambda$, $r = 5\lambda$, расположении приемных антенн в секторе $\Delta\gamma_R = \pi/4$.

При большой скорости вращения объекта практический интерес представляет средняя за период вращения пропускная способность канала передачи информации.



а)

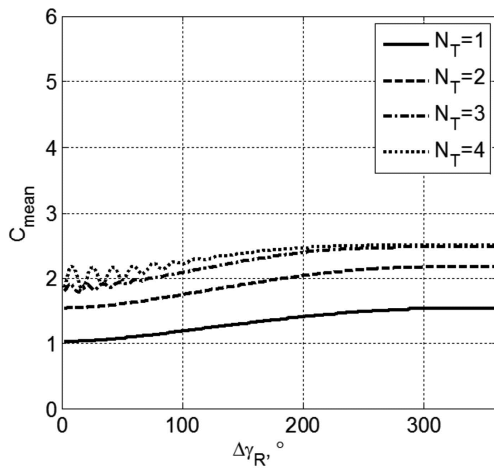


б)

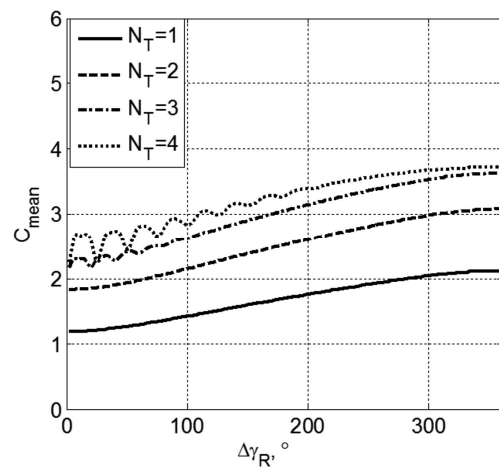
Рис. 3. Пропускная способность системы передачи информации $\Delta\gamma_R = \pi/4$ а) $N_R = 1$; б) $N_R = 2$;

в) $N_R = 3$; г) $N_R = 4$

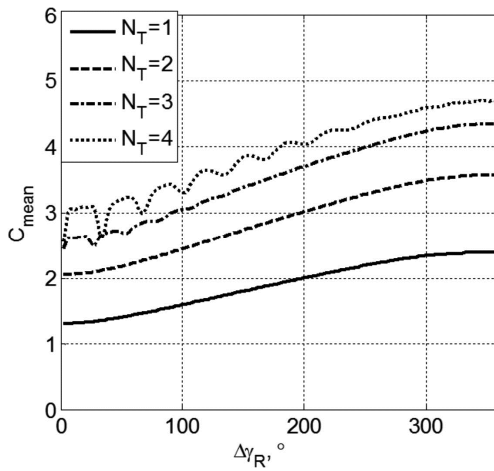
В этом случае потенциальную пропускную способность можно получить путем использования перемежения в сочетании с эффективным помехоустойчивым кодированием. На рис. 4 а, 4 б, 4 в, 4 г, 4 д и 4 е приведены зависимости средней пропускной способности от углового сектора расположения приемных антенн при различном числе передающих антенн.



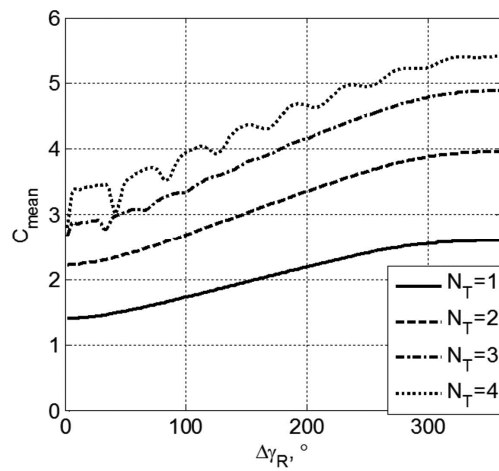
а)



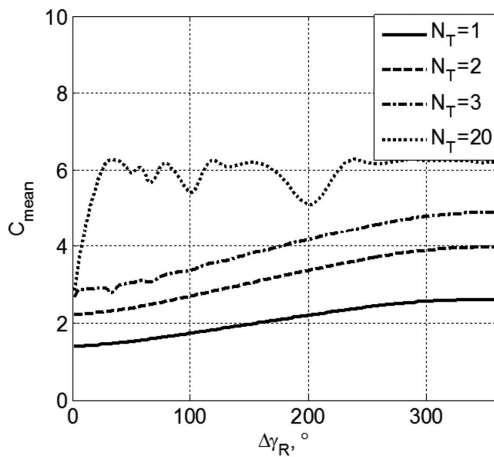
б)



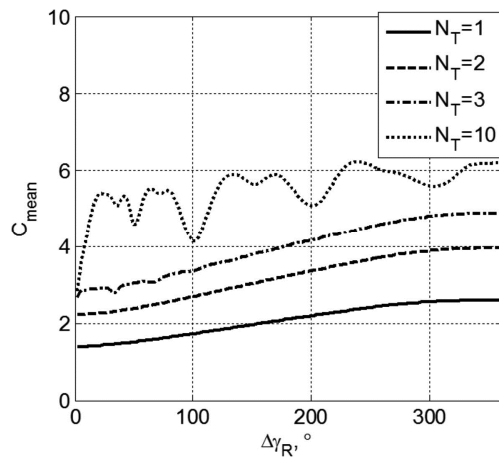
в)



г)



д)



е)

Рис. 4. Средняя за период вращения пропускная способность а) $N_R = 2$; б) $N_R = 3$; в) $N_R = 4$; г) $N_R = 5$; д) $N_R = 5$; е) $N_R = 5$

Заключение

На основании результатов проведенного исследования мгновенной и средней пропускной способности предлагаются два варианта технической реализации высокоскоростной системы передачи информации с вращающегося объекта на наземный пункт приема.

В первом случае предполагается размещение на борту летательного аппарата кольцевой заполненной антен-

ной решетки, с диаграммой направленности, свободной от глубоких провалов и дифракционных лепестков. В этом случае обеспечивается минимальная вариация мгновенной пропускной способности в зависимости от ориентации объекта, а также максимальная пропускная способность. Вместе с тем ограничения на механическую прочность корпуса объекта и сложность реализации передающего тракта, содержащего N_T усилителей мощности или СВЧ тракт фазирования и распределения мощности элемен-

тов антенной решетки от одноканального передатчика не позволяют реализовать данный вариант при большом числе антенн. Кроме того, реализация многоканального передатчика и СВЧ тракта фазирования и распределения мощности с необходимым коэффициентом полезного действия затруднена вследствие ограничений на массогабаритные параметры бортовой аппаратуры. Установка кольцевой заполненной антенной решетки в конструкцию объекта с диаметром, превышающим 1...2 длины волны, сопровождается изменениями в конструкции объекта, приводящими к уменьшению механической прочности, что не всегда допустимо.

Второй вариант высокоскоростной системы передачи информации предполагает размещение на борту объекта малозлементной кольцевой антенной решетки и многопозиционной наземной приемной системы. Высокая средняя пропускная способность достигается при использовании эффективного помехоустойчивого кодирования. При этом реализация кодирования и декодирования, обеспечивающего необходимую скорость передачи информации, может потребовать значительных вычислительных ресурсов. Одним из главных недостатков рассматриваемого метода являются чрезвычайно высокие требования к объему оперативной памяти кодирующего устройства, входящего в состав бортовой передающей аппаратуры. Объем требуемой памяти возрастает пропорционально квадрату периода вращения летательного аппарата. Рассматриваемый метод чувствителен к ширине и количеству глубоких провалов более 10 дБ в диаграмме направленности антенной решетки бортовой передающей аппаратуры. При наличии глубоких провалов в диаграмме направленности резко снижается достоверность передаваемой информации. Дополнительным ограничением второго метода является необходимость измерения коэффициентов канальной матрицы канала связи с частотой, зависящей от характерной скорости перемещения летательного аппарата и требование наличия соответствующего обратного канала связи.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект 14-19-01263) в Рязанском государственном радиотехническом университете.

Литература

1. Булгаков Н.Н., Альбин В.Г., Кривошеин А.А. Особенности построения бортовой аппаратуры командно-измерительной системы космического аппарата для управления им как в зоне его радиовидимости с наземной станцией, так и вне ее // *Материалы 24-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2014)*. Севастополь: Вебер, 2014. – С.6-9
2. Паршин Ю.Н., Кудряшов В.И., Кудряшова А.А. Особенности разработки ММО канала связи с беспилотными аппаратами // *Материалы 24-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2014)*. Севастополь: Вебер, 2014. – С. 253-254
3. Марков Г.Т., Сазонов Д.М. *Антенны: Учебник для студентов радиотехнических специальностей ВУЗов*. М.: Энергия, 1975
4. Паршин Ю.Н., Ксендзов А.В. Влияние пространственной корреляции на эффективность оптимизации пространственной структуры многоантенной системы при разнесенном приеме // *Вестник Рязанской государственной радиотехнической академии*, вып. 19. Рязань: Изд. РГРТУ, 2006. – С. 54-62.
5. Kuhn V. *Wireless Communications over MIMO channels. Applications to CDMA and multiple antenna systems* – John Wiley & Sons, Ltd. 2006.
6. Шлома А.М., Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Шумов А.П. *Новые алгоритмы формирования и обработки сигналов в системах подвижной связи* / Под ред. проф. А.М. Шломы. – М.: Горячая линия-Телеком, 2008. – 244 с.
7. Колесников Е.П. Особенности расчета энергетики радиолиний измерительных систем при пусках ракет // *Радиотехника*, 2004, №6, с. 70-80.