

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ***Калюжный Анатолий Тимофеевич***

канд. техн. наук, доцент

Новосибирский государственный аграрный университет

г. Новосибирск, Новосибирская область

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМНОЙ НАВИГАЦИИ ТРАКТОРНЫХ
АГРЕГАТОВ**

***Аннотация:** в статье представлен анализ амплитудных методов определения взаимного положения ведущего и ведомого машинно-тракторных агрегатов в магнитном поле вертикальной рамки. Автором установлены математические зависимости погрешности и чувствительности навигационных устройств местоопределения от координат взаимного положения агрегатов.*

***Ключевые слова:** сельскохозяйственная электронавигация, дублирное вождение, магнитное поле рамки, взаимное местоположение.*

На этапе перехода от ручного управления сельскохозяйственными машинно-тракторными агрегатами (МТА) к автоматическому практическое применение может найти автоматизированное групповое управления на базе дублирного вождения, когда ведомый трактор-дублер автоматически отслеживает траекторию ведущего трактора-лидера. При этом для определения их взаимного положения могут найти применение индукционные методы электронавигации.

В качестве источника навигационного магнитного поля удобно применять круговую рамку с переменным током [1, 2]. Поле рамки не обладает сферической симметрией, поэтому технические параметры навигационных устройств, формирующих сигналы рассогласований по интервалу и дистанции, существенно зависят от пространственной ориентации рамки.

В [2] описаны методы взаимной навигации агрегатов при горизонтальном расположении рамки; в настоящей работе рассматривается определение взаимного положения МТА при расположении рамки в вертикальной плоскости.

Взаимное положение ведущего и ведомого агрегатов характеризуется взаимным боковым смещением или интервалом b , дистанцией d и взаимными углами курса α , крена γ и галопирования ψ . Безусловным приоритетом обладает формирование сигнала траекторного рассогласования как разности между требуемым и фактическими значениями интервала.

В навигации для определения места нахождения объекта применяют т.н. «метод засечек», суть которого заключается в определении места объекта как точки пересечения двух линий возможного положения объекта. Этот же метод можно применять для определения взаимного положения МТА индукционными методами, используя в качестве линий возможного положения равносигнальные линии (изолинии) переменного магнитного поля, создаваемого на одном из агрегатов. В этом случае одна из линий возможного положения будет характеризовать интервал, а вторая – дистанцию. Причем точность метода ограничивается кривизной равносигнальных линий, используемых в качестве линий возможного положения и соответствующих измеренным значениям навигационного параметра (модуля или проекции вектора напряженности).

«Взаимное положение» предполагает положение ведущего агрегата относительно ведомого или наоборот – ведомого относительно ведущего. Эти значения совпадают при движении агрегатов параллельными курсами, когда параллельны их продольные оси. Но если агрегаты движутся по криволинейным траекториям, то положения ведущего относительно ведомого и ведомого относительно ведущего будут различными, следствием чего является зависимость траектории дублера от способа определения взаимного положения агрегатов.

В [1, 2] показано, что модуль напряженности магнитного поля в меридиональной плоскости рамки описывается уравнением:

$$H = M \sqrt{1 + 3 \cos^2 \theta} / r^3, (1)$$

где M – магнитный момент рамки,

θ – зенитный угол точки наблюдения напряженности магнитного поля,

r – расстояние от точки наблюдения поля до центра рамки.

Расположим рамку на тракторе-лидере в вертикальной плоскости таким образом, чтобы аксиальная ось рамки была параллельна продольной оси трактора. Для анализа методов взаимной навигации в центре рамки разместим начало прямоугольной системы координат $OXYZ$ и направим ось OZ вдоль аксиальной оси рамки, а радиальную ось OX – вертикально вверх. Тогда значение интервала b будет определяться координатой y места нахождения точки измерения напряженности магнитного поля на дублере; значение дистанции d – координатой z .

Амплитудные методы взаимной навигации при движении агрегатов шеренгой.

Будем идентифицировать место агрегата точкой расположения на нем рамки или приемника магнитного поля. Тогда «движение шеренгой» означает, что нормально приемник магнитного поля находится в плоскости рамки и дистанция $d = z = 0$. При отставании или опережении дублером лидера дистанция принимает ненулевые положительные или отрицательные значения.

Как показано в [1], равносигнальные линии модуля вектора напряженности магнитного поля образуют в меридиональной плоскости ZOY овал, состоящий из двух полуокружностей, концы которых соединены практически прямыми линиями, длина которых составляет 52% радиуса полуокружности. Это позволяет определять интервал b при движении агрегатов шеренгой по величине модуля вектора напряженности, а ошибку траекторного управления дублера формировать как разность измеренного H и требуемого H_0 значений модуля вектора напряженности:

$$\delta = \Delta b \equiv H - H_0 \quad (2)$$

В таблице 1 приведены результаты вычисления координат точек РСЛ модуля вектора напряженности, проходящей через точку с координатами ($z = 0$; $y = 10$ отн. единиц).

Таблица 1

Θ , град	r , отн.ед	z , о.е.	y , о.е.	Δ_y , %
0	12,6	12,6	0	100
15	12,49	12,06	3,23	67,67
30	12,17	10,54	6,085	39,15

45	11,65	8,238	8,238	17,62
60	10,98	5,489	9,507	4,93
75	10,31	2,668	9,96	0,414
90	10	0	10	0
105	10,31	-2,6684	9,958608	0,413917
120	10,98	-5,48879	9,506857	4,931427
135	11,65	-8,23774	8,237745	17,62255
150	12,17	-10,5401	6,085327	39,14673
165	12,49	-12,0658	3,233021	67,66979
180	12,6	-12,5992	0	100

Последний столбик в таблице показывает процентное отклонение координаты $y = b$ от номинального значения 10 отн. единиц.

Данные таблицы 1 показывают, что при формировании траекторного рассогласования согласно (2) изменение дистанции d в диапазоне $|z| < 0,27b$ будет сопровождаться изменением интервала b не более чем на $\pm 0,21$ %. Так, если интервал $b = 10$ м, то изменение дистанции на $\pm 2,7$ м изменит интервал не более чем на $\pm 2,1$ см.

Динамическая чувствительность навигационных устройств пропорциональна производной от напряженности по измеряемой координате в точке наблюдения поля. Для её определения перепишем уравнение (1):

$$H = \frac{M}{r^4} \sqrt{r^2 + 3z^2} = \frac{M}{(z^2 + y^2)^2} \sqrt{y^2 + 4z^2}. \quad (3)$$

Продифференцировав (3) по y , получим:

$$K_y = \frac{dH}{dy} = -3H y \frac{5z^2 + y^2}{(z^2 + y^2)^3 \sqrt{4z^2 + y^2}} \approx \frac{-3M}{y^4}.$$

Следовательно, при изменении интервала $b = y$ в два раза допустимый диапазон изменения дистанции также возрастет в два раза, но одновременно чувствительность снизится, и зона нечувствительности системы траекторного управления возрастет в $2^4 = 16$ раз. Поэтому для восстановления прежней ширины зоны нечувствительности потребуется увеличить в 16 раз коэффициент передачи датчика напряженности или магнитный момент рамки M .

Поскольку в диапазоне $75 \leq \theta \leq 105^\circ$ равносигнальные линии напряженности параллельные, и взаимное перемещение агрегатов осуществляется вдоль равносигнальных линий, то в указанном диапазоне чувствительность навигационного устройства измерения интервала практически не зависит от координаты z .

Метод можно также реализовать, повернув рамку вокруг вертикальной оси ОХ на угол 90° и поменяв местами оси ОZ и ОY. Это увеличит напряженность магнитного поля в точке измерения в два раза и позволит при прочих равных условиях увеличить интервал в 1,26 раз. Однако при этом возрастет зависимость интервала от дистанции, так как ведомый агрегат будет перемещаться относительно ведущего не по прямой, а по дуге окружности, радиус которой составит $b/1,26 = 0,8b$. Так, если $b = 10$ м, то погрешность измерения интервала $\pm 2,1$ см будет достигнута уже при изменении дистанции в диапазоне $\pm 0,9$ м. Кроме того, возрастет влияние крена рамки, так как отклонение зенитного угла θ от нулевого значения уменьшает напряженность магнитного поля согласно (1).

Достоинством измерения интервала по величине модуля напряженности является низкая чувствительность к изменению магнитного момента рамки; так, при $b=10$ м изменение магнитного момента M рамки на 1% изменит боковое смещение b на 3,3 см. Метод обеспечивает также незначительную чувствительность навигационных устройств к изменению углов крена и галопирования как лидера, так и дублера.

Если напряженность измеряется впереди плоскости рамки, то изменение направления движения лидера изменит направление движения дублера в ту же сторону. Но если датчик напряженности отстает от рамки, то первоначально направление поворота дублера будет противоположным.

Рамку можно размещать на дублере, а напряженность измерять на лидере. При этом качество траекторного регулирования изменится – при положении рамки впереди датчика напряженности взаимное положение агрегатов может оказаться неустойчивым, так как поворот дублера, например, в сторону лидера

будет сопровождаться уменьшением измеряемой напряженности, в результате чего система траекторного управления сформирует сигнал на дальнейший поворот дублера в ту же сторону.

При движении агрегатов шеренгой измерять дистанцию d можно по величине проекции вектора напряженности на поперечную ось дублера. При этом измеряемое значение проекции вектора напряженности:

$$H_d = H \sin(\theta + \arctg(0,5 \operatorname{tg} \theta)).$$

Это выражение можно переписать:

$$H_d = \frac{M}{\sqrt{(z^2 + y^2)^3}} \sqrt{1 + 3 \cos^2 \theta} \cdot (\sin \theta \cdot \cos(\arctg(0,5 \operatorname{tg} \theta)) + \cos \theta \cdot \sin(\arctg(0,5 \operatorname{tg} \theta))). \quad (4)$$

Учитывая, что: $\cos \theta = \frac{z}{\sqrt{z^2 + y^2}}$;

$$\arctg(0,5 \operatorname{tg} \theta) = \arctg\left(\frac{y}{2z}\right) = \arccos \frac{2z}{\sqrt{4z^2 + y^2}} = \arcsin \frac{y}{\sqrt{4z^2 + y^2}},$$

выражение (4) после преобразований принимает вид:

$$H_d = 3M \frac{zy}{(z^2 + y^2)^{5/2}}.$$

Статическая чувствительность навигационных устройств измерения дистанции (без коррекции) определяется как отношение измеренного сигнала к величине отклонения дистанции от нулевого значения:

$$K_\delta = H_d/z = 3M \frac{y}{(z^2 + y^2)^{5/2}}.$$

Динамическая чувствительность навигационных устройств измерения дистанции K_d в заданной точке равна производной от напряженности по измеряемой координате:

$$K_d = \frac{dH_d}{dz} = 3My \frac{y^2 - 4z^2}{(z^2 + y^2)^{7/2}}.$$

Зависимость H_d (сигнала рассогласования дистанции), статической чувствительности K_δ и динамической чувствительности K_d устройств измерения дистанции от относительного значения дистанции z/y показана на рис. 1.

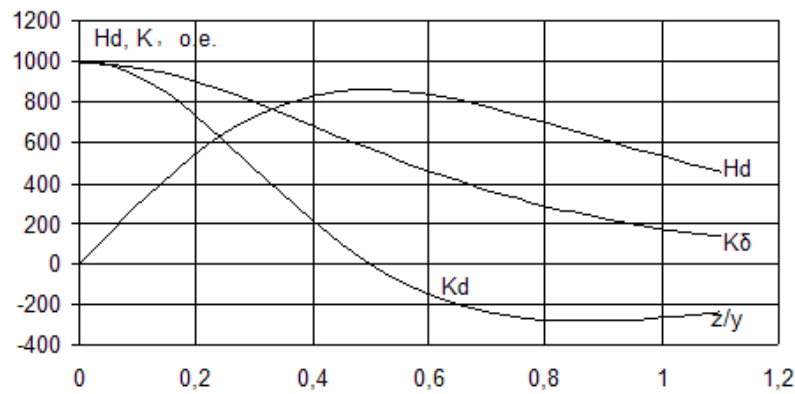


Рис.1. Зависимость сигнала рассогласования дистанции H_d , статической K_δ и динамической K_d чувствительности от величины дистанции z/y

Амплитудные методы взаимной навигации МТА при движении колонной.

При движении агрегатов колонной амплитудный метод определения траекторного рассогласования возможен по величине проекции вектора напряженности на направление, образующее с осью OZ рамки угол $\zeta = 90 - (\theta + \arctg(0,5\operatorname{tg}\theta))$, а с поперечной осью дублера – угол $\chi = \arctg(0,5\operatorname{tg}\theta)$. Целесообразно выбирать значение угла θ равным нулю – тогда осью проекции является поперечную ось дублера. В этом случае дублер ориентируется относительно лидера вдоль магнитных силовых линий рамки, а измеренное значение проекции вектора напряженности на ось OY описывается уравнением (5). Но так как теперь измеряемой является координата y , то статическая чувствительность устройства формирования сигнала траекторного рассогласования:

$$K_\delta = H_y/y = 3M \frac{z}{(z^2 + y^2)^{5/2}},$$

а динамическая:

$$K_y = \frac{dH_\delta}{dy} = 3Mz \frac{z^2 - 4y^2}{(z^2 + y^2)^{7/2}}.$$

Зависимость сигнала траекторного рассогласования H_y , статической и динамической чувствительности формирователей траекторного рассогласования показана на рис. 2.

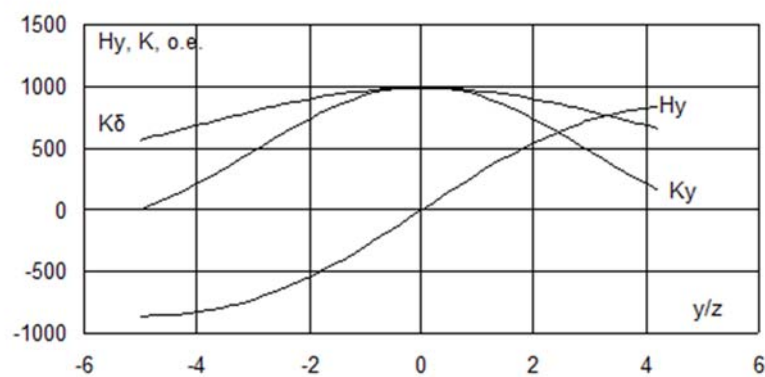


Рис. 2. Основные параметры формирователя траекторного рассогласования при движении МТА колонной

Интервал и дистанция представляют собой прямоугольные координаты места нахождения дублера. Представляет интерес выяснить особенности этой измерительной системы координат BOD.

При движении агрегатов шеренгой вращение дублера вокруг вертикальной оси, совмещенной с приемником магнитного поля, на величину сигнала траекторного рассогласования не влияет. Следовательно, система координат BOD связана с рамкой и совпадает с системой YOZ, поворот которой вокруг вертикальной оси OX изменит измеряемые значения интервала и дистанции.

Иная картина наблюдается при движении агрегатов колонной, когда измеряемое значение ошибки траекторного управления (интервала) зависит от направления продольных осей обоих агрегатов – ведомого и ведущего.

Можно принять, что в последнем случае начало системы координат BOD совмещено с приемником магнитного поля, а ось ОВ направлена параллельно поперечной оси дублера. При этом нулевому значению рассогласования будет соответствовать направление продольной оси дублера не на рамку, а на некоторый виртуальный ориентир, лежащий на оси OZ рамки, на расстоянии $L = OM$ от неё, рис. 3.

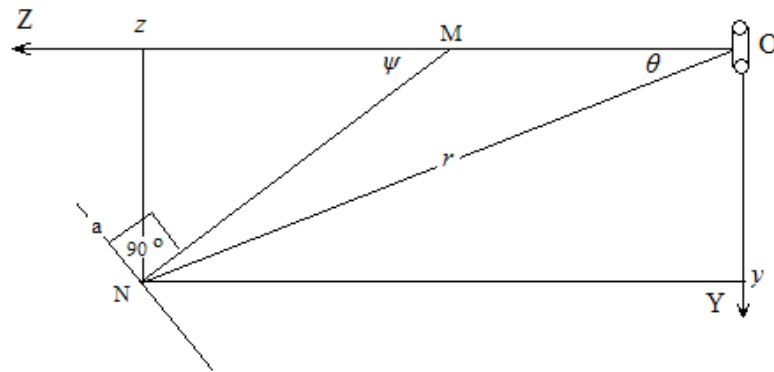


Рис. 3. Смещение виртуального ориентира М вдоль оси OZ при отклонении дублера N от оси OZ рамки на расстояние y

На рис. 3 отрезок «а» – ось проекций вектора напряженности, параллельная поперечной оси дублера N. В точке N вектор напряженности совпадает с направлением MN. Угол $\psi = \theta + \arctg(0,5\operatorname{tg} \theta)$, угол $MNO = \arctg(0,5\operatorname{tg} \theta)$. Поэтому:

$$OM = \frac{r \sin(\arctg(0,5\operatorname{tg} \theta))}{\sin(\theta + \arctg(0,5\operatorname{tg} \theta))} =$$

$$\frac{r \cdot \operatorname{tg} \theta}{\sqrt{4 + \operatorname{tg}^2 \theta} \cdot (\sin \theta \cdot \cos(\arctg(0,5\operatorname{tg} \theta)) + \cos \theta \cdot \sin(\arctg(0,5\operatorname{tg} \theta)))} = \frac{r}{3 \cos \theta} = \frac{z^2 + y^2}{3z}.$$

Таким образом, даже при малых отклонениях дублера от продольной оси рамки ориентиром является не рамка, а точка на оси OZ рамки, смещенная в сторону дублера на расстояние, равное 1/3 фактического значения дистанции между агрегатами. По мере увеличения зенитного угла θ это расстояние возрастает, и при $\theta = 54,75^\circ$ лидер и дублер расположатся взаимно перпендикулярно. При дальнейшем увеличении зенитного угла отрезок OM продолжает возрастать и при $\theta = 90^\circ$ достигает бесконечности – мгновенный поворот лидера на 90° по часовой стрелке способен изменить направление продольной оси дублера на такой же угол против часовой стрелки, так что тракторы окажутся развернутыми в противоположные стороны.

При движении агрегатов вдоль горизонталей склонов происходит сползание вниз по склону как агрегатируемой машины ведущего агрегата с рамкой, так и трактора-дублера с датчиком магнитного поля. Поэтому движение вдоль горизонталей возможно только при направлении продольных осей агрегатов вверх по

склону на величину угла скольжения, в результате чего между продольными осями и векторами скорости рамки и датчика образуются ненулевые углы взаимного бокового скольжения. Появится погрешность траекторного управления, обусловленная несовпадением динамических и статических продольных осей рамки и датчика. При одинаковых углах α скольжения рамки и датчика величина погрешности $\Delta = d \sin \alpha$; при отсутствии скольжения датчика погрешность $\Delta = d \sin \alpha / 3$, а при скольжении датчика в противоположную рамке сторону на угол $\alpha / 3$ погрешность отсутствует. Так, при одинаковых углах скольжения, например, $\alpha = 10^\circ$ и дистанции $d = 6$ м, погрешность составит 0,1 м.

Боковое скольжение тракторов наблюдается при движении не только на склонах, но и по горизонтальной поверхности, что является следствием неидентичности движителей трактора по бортам, асимметричностью приложения тягового сопротивления агрегатируемых машин/орудий, состоянием почвы и др. Что следует иметь в виду при автоматизации траекторного управления МТА не только при дублирном вождении.

Список литературы

1. Калюжный А.Т. Теория сельскохозяйственной навигации: магнитное поле круговой рамки. // Новое слово в науке: перспективы развития. Сборник статей Международной научно-практической конференции. (Чебоксары, 10.09.2014 г.) редкол.: О.Н.Широков [и др.].- Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2014 – 364. С. 207-211.

2. Калюжный А.Т. Анализ индукционных методов взаимной навигации тракторных агрегатов [Электронный ресурс] // Вестник науки Сибири. – 2014 – № 1(11) – С.84-97. – режим доступа: <http://sjs.tpu.ru/journal/article/view/896/622>